

العلوم الأساسية
أساسيات الجيولوجيا الفيزيائية
أ.د. محمد أحمد حسن هيكل
د. عبد الجليل عبد الحميد هويدى
مكتبة الدار العربية للكتاب

أسـاسيات

الجيولوجيا الفيزيائية

مكتبة الدار العربية للكتاب

الهيئة الاستشارية

الإشراف العام

أساسيات
الجيولوجيا الفيزيائية

أ.د. محمد أحمد حسن هيكل
أستاذ الجيولوجيا
كلية العلوم – جامعة الأزهر

أ.د. عبد الجليل عبد الحميد هويدى
أستاذ ورئيس قسم الجيولوجيا
كلية العلوم – جامعة الأزهر

مكتبة الدار العربية للكتاب
16 عبد الخالق ثروت تليفون: 23910250
فاكس: 23909618 - ص.ب 2022
E-mail:info@almasriah.com
www.almasriah.com

رقم الإيداع : 1607 / 2008
الترقيم الدولى : 8 - 598 - 293 - 977

الطبعة الأولى : ربيع آخر 1429 هـ - أبريل 2008 م

بسم الله الرحمن الرحيم

◆ لماذا هذه السلسلة ؟ ◆

لقد كانت هناك دوافع كبيرة وكثيرة ، تدفعنا إلى إصدار هذه السلسلة عن العلوم الأساسية فى : علم الكيمياء – علم الفيزياء – علم الرياضيات – علم النبات – علم الحيوان – علم الجيولوجيا ، باللغة العربية، دوافع تجاوزت بكثير تلك المصاعب الجسام التى عانينا بعضًا منها، ولازلنا نعانى بعضها الآخر .. تلك المتاعب التى تفرضها طبيعة إصدار مثل هذه الأعمال الضخمة المتشعبة الإنتاج .. الباهظة التكاليف .. الرفيعة المستوى والمتميزة .

وقد تمثلت الإجابة عن السؤال الذى يخطر ببال الجميع: زملاء فى ميدان النشر .. مؤلفين يشاركوننا المسيرة .. قراء نعتز بتواصلهم معنا، فى كل ما نقدمه لهم من إصدارات جديدة بعقولهم.. فى المحاور التالية :

* الإيمان العميق بالدور الحيوى الذى تسهم به هذه العلوم الأساسية فى إحداث نهضة علمية لأمتنا العربية، التى أصبحت فى أشد الحاجة لتحقيق طفرة علمية؛ لكى تلحق بالدول المتقدمة، التى أخذت من الحضارة العربية والإسلامية العلوم الأساسية ونهضت بها، وتأخرنا نحن عنها؛ نتيجة ذلك الفقر الشديد الذى تعانى منه المكتبة العربية فى نشر العلوم الأساسية باللغة العربية .. دون أن ينسحب ذلك على دعوة إلى إهمال اللغة الأصلية التى تصدر بها هذه العلوم، لما فى ذلك من دعوة إلى الانغلاق والتقوقع، لا تليق مطلقًا، بطلاب علم ومعرفة ، تتجدد أبعادهما فى كل لحظة نعيشها .. وتتوالى انشطاراتهما فى كل ثانية من حولنا .

* إصدار هذه السلسلة باللغة العربية ، بعد إسناد مسئولية هذه الإصدارات العلمية الراقية المستوى إلى كبار الأساتذة الأجلاء ، المشهود لهم بالمكانة العلمية والخبرة الأكاديمية ، التى حرصنا – كل الحرص – على أن تتضمن هذه المسئولية وجود هيئة استشارية ، على أعلى مستوى ، ترشح أكثر من أستاذ فى التخصص الواحد ، وتقوم بتحكيم المادة العلمية ، وإجازة ما يتفق منها وقواعد النشر ، مع القيام بكل أعمال التنسيق والمتابعة .. إن الاحتكام إلى هذه المنظومة بكل تشابكاتها وأبعادها ليضمن للقارئ – المتخصص وغير المتخصص – مادة رفيعة المستوى ، وتواصلاً مع أحدث ما وصل إليه كل علم من العلوم ، التى تتضمنها إصدارات هذه السلسلة ، لنكمل مسيرة من سبقونا فى نشر هذه العلوم الأساسية باللغة العربية ؛ الأمر الذى يضمن المواكبة لكل دقائق مستحدثة ونظريات مستحدثة فى هذه العلوم .

* توجيه إصدارات هذه السلسلة إلى طلاب الجامعات والمعاهد بمصر وكافة البلدان العربية، الذين يدرسون بكليات العلوم والتربية والزراعة والفرق الأولى والإعدادية بكليات الطب وطب الأسنان والصيدلة .. ذلك التوجيه المسبق بالحرص على ضرورة أن تغطى كل إصدارة جميع المفردات والعناوين والموضوعات التى يمكن أن تخاطب اهتمام أى طالب جامعى ، بأسلوب علمى دقيق ولغة سليمة .. ليضمن استفادة الطلاب – على

اختلاف دراساتهم أو جنسياتهم – الكاملة من الإصدارة .. كل ذلك فى إشارة واضحة إلى ما انتوينا تحقيقه من البداية : العمل على تكوين الطالب الباحث ، القادر على نهل المعرفة من منابعها ومصادرها الحقيقية دون تشويه أو تزيد .

* لقد حرصنا على أن تتضمن كل إصدارة من هذه السلسلة :

- جزءًا خاصًا بالمسائل والتمارين المحلولة فى نهاية كل فصل أو باب ، كلما كان ذلك ممكنًا وضروريًا.
- جزءًا خاصًا بالأسئلة العامة والمسائل غير المحلولة فى نهاية كل فصل أو باب ؛ حتى يتمكن الطالب من أن يقيّم مدى تحصيله .
- تثبيت الكتاب بالملاحق والجداول الخاصة .
- الإشارة إلى الكتب والمراجع ، التى يمكن للدارس أن يرجع إليها ؛ لمزيد من الاطلاع .
- تزويد الأشكال والرسومات بالإيضاحات اللازمة .
- ضرورة ذكر المراجع والمصادر العربية والأجنبية التى تمت الاستعانة بها ، مع ضرورة توضيح ذلك فى النص والهوامش .
- ضرورة وجود ملحق كامل للمصطلحات التى تتناولها الإصدارة ، باللغتين العربية والإنجليزية..

* كل هذا الحرص ليدل – بشكل واضح – على رغبتنا فى أن نصل بالعمل إلى أعلى مستوياته ؛ لتتحقق لطالبنا الجامعى الأدوات والوسائل ، التى تعده خير إعداد لمواصلة رحلة البحث والعطاء ، والقدرة على التواصل مع تلك التظاهرات العلمية المتتابعة ، المضطردة، والآخذة فى النمو والتسارع.

* ومجاراة لأحدث تقنيات العصر ، يزمع القيام – فى المستقبل- بإصدار «CD» ملحقة بكل ما يصدر بهذه السلسلة من مؤلفات ، حتى تتيح للطالب فى الوقت نفسه أن يرى مادة الكتاب ونظرياته وما يعرض من علوم ومعارف متجسدة أمامه .. يسمعها ويراها ويتابعها فى شكل حى ، وتمنحه الفرصة لأن يقف على مستوى أدائه وتحصيله من خلال تقييمه الذاتى لهذا التحصيل ؛ مما يخلق لديه فرصة رائعة لأن يتفوق فى هذا الفرع من العلم ؛ نتيجة سرعة الاستيعاب والفهم الدقيق لمكونات كل جزء من أجزاء الإصدارة ..

* ... وفى النهاية ... نصل إلى ذلك المحور ، الذى يحدونا دائمًا فى كل أعمالنا ، ألا وهو مسئوليتنا نحو قارئنا ومصرنا وأمتنا العربية بأسرها .. ولغتنا الأصيلة الغالية .. التى ندعو الله أن يحفظها دائمًا لغة للعلم والحضارة والعطاء .. فقد كنا سادة لحضارة بنى الإنسان .. ولا نظن أن العودة إلى تلك المكانة مستحيلة ...

والله ولى التوفيق .

الناشر

♦ تقـديم ♦

شهد القرن العشرين عددًا من المحاولات الجادة والمخلصة ؛ من أجل أن تكون اللغة العربية لغة للعلـم فى العالم العربى ، من خلال تأليف أو ترجمة عدد لا بأس بـه مـن الكتـب العلميـة المهمـة فى مختلـف فـروع العلوم . إلا أن العلم بطبيعته متطور ومتغير ، ويشهد الجديد والتجديد كل صباح . بل إن العلم فى العقـود الأخيرة من القرن العشرين شهد قفزة ضخمة ؛ بسبب ثورة المعلومات واختراع الكمبيوتر (الحاسـوب) ، وما تلاه من نشر شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت) . وهذا يستلزم أن تصدر كتب باللغة العربية تلاحق التطور العلمى وتنقله لدارسينا فى الجامعات والمعاهد العربية بالمعدل نفسه الذى يصدر به فى مختلف أنحـاء العالم المتقدم ، حتى نساير النهضة العلميـة العالميـة ونـسير فى ركابهـا . ولا يكفـى فى هـذه الحالـة أن نَهُبَّ مدفوعين بحماس ثورى ، نصدر عددًا من الكتب العلمية ، ثم يخبو حماسنا وينضب لنجد أنفسنا وقد تخلفنا عن ركب العلم بأميال كثيرة . وإنما يجب أن تكون هناك حركة مستمرة دائبـة يـصدر عنهـا الجديـد فى كـل مجالات العلوم باستمرار .

لهذه الأسباب قامت « مكتبة الدار العربية للكتاب » بإصدار «سلسلة العلوم الأساسية » ، وهى سلسلة من الكتب العلمية المتخصصة ، يختص كل منها بأحد فروع العلوم الأساسية . ويغطى الكتـاب الـذى بـين أيدينا « أساسيات الجيولوجيا الفيزيائية » وهو منهج مهم لدارسى الجيولوجيا كمـنهج مـستقل أو مـشترك مع مناهج أخرى لطلاب كليات العلوم أو الهندسة أو الزراعة أو التربية أو غيرها . ونأمـل أن يغطـى هـذا الكتاب نقصًا فى المكتبة العربية فى كتب الجيولوجيا باللغة العربية نستشعره بـشكل واضـح ؛ خاصـة تلـك التى تهتم بمكونات الأرض ، ومناقشة الأحداث الجيولوجية التى أثرت عليها طوال تاريخهـا الطويـل ، فى ضوء المعطيات العلمية الحديثة ، التى تم التوصل إليها خلال العقود الأخيرة من القرن العشرين .

وإننا إذ نقدم هذا الكتاب كمقدمة لدراسة علم الجيولوجيا فى المراحل الأولى الجامعية ، يحـدونا أمـل فى أن نكون قد أسهمنا بإضافة جديدة للمكتبة العربية ، وساعدنا فى وضع لبنة أساسية فى بناء مكتبة عربيـة فى مجال العلوم الجيولوجية .

وتود الهيئة الاستشارية تقديم وافر الشكر للدارسين ، ولكل من ساهم فى إصـدار هـذه السلـسلة ، لمـا تمثله من إثراء للمكتبة العربية ومساهمة بناءة فى رفع مستوى التعليم الجامعى فى العالم العربى .

والله ولى التوفيق ،،،

الهيئة الاستشارية

علم الجيولوجيا

مقـــــدمة

الأرض جرم صغير جدا يسبح فى الكون الفسيح ، إلا أنه المكان الوحيد المعروف حتى الآن أنه يوجد عليه ماء فى الحالة السائلة ، وبالتالى توجد عليه حياة ، والأهم أنه مسكننا ومأوانا نحن البشر . فمن الأرض نستمد الموارد اللازمة لبناء حضارتنا الحديثة ، وكذلك المستلزمات الضرورية لوجود الحياة واستمرارها فوق سطحها . ولهذا ، فإن معرفتنا بكوكبنا تعتبر مسألة جوهرية وأساسية لعيشنا عليه . ويسهم علم الجيولوجيا بنصيب وافر فى إمدادنا بالمعلومات التى تساعدنا على فهم كوكب الأرض .

وتعمل وسائل الإعلام الحديثة فى العقود الأخيرة على وضعنا فى قلب الأحداث من بعض القوى الجيولوجية النشطة على سطح الأرض ، وما نشاهده من أعداد ضخمة من البشر تُركوا بلا مأوى بعد ثورات البراكين أو الهزات الأرضية العنيفة الناتجة عن الزلازل أو الفيضانات . مثل هذه الأحداث والكثير غيرها تدمر الحياة والمنشآت القائمة ، مما يحتم ضرورة أن يكون لدينا فهم جيد لها وقدرة على التعامل الرشيد معها لتجنب أو التقليل من آثارها المدمرة . ويتطلب الاستعداد لهذه الأحداث معرفة ماذا قدم العلم ونظرياته لفهم كوكب الأرض بصخوره وجباله وأغلفته : الجوى والمائى والحيوى .

ولأن كوكب الأرض يسكنه كل البشر على اختلاف ألوانهم وألسنتهم ، والجيولوجيا هى العلم الذى نستمد من خلاله معلوماتنا عن كوكبنا ، وللحاجة الماسة إلى نشر وعى ثقافى وعلمى عن كوكب الأرض فى وطننا العربى الكبير ، ولما نشعر به من فقر المكتبة العربية فى كتب تقدم المعلومات الأساسية عن كوكب الأرض بلغة الضاد ، فقد سعينا لنقدم هذا المؤلف بلغة عربية سهلة ميسرة تبتعد عن استخدام مصطلحات فنية صعبة أو لغة معقدة فى شرح الظواهر المختلفة حتى نيسر للجميع قراءته واستيعابه .

ويعتمد علم الجيولوجيا أساسا على المرئيات ، كما تحتاج كتبه إلى كثير من الصور والأشكال التوضيحية والخرائط ، ولذا حرصنا دائما أن تكون المواد التوضيحية وفيرة وواضحة ، بل وحاولنا جاهدين أن تكون تلك المواد من منطقتنا العربية عموما ومصر خصوصا لتكون أكثر واقعية وتأثيرا .

ولأن هذا الكتاب طلابى فى الأساس، فقد ذيلنا كل فصل بملخص لمحتوى الفصل ومجموعة من الأسئلة التى تيسر على الطالب عملية المراجعة والاستذكار وقائمة بالمصطلحات المهمة التى وردت فى ثنايا الفصل ووضعت بحروف سوداء لتوضيحها. كما يتضمن الكتاب فى نهايته معجما بالمصطلحات المهمة التى وردت بالكتاب ، بالإضافة إلى بعض المصطلحات الأخرى التى قد يحتاجها الطالب . ولإطلاع الطالب على أحدث المعلومات الجيولوجية التى تضعه فى واجهة الأحداث ، ذيلنا كل فصل بقائمة بمجموعة من المواقع الإلكترونية على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت) التى تعرض أحدث ماصدر فى موضوع الفصل.

وجدير بالملاحظة أن وضع كتاب يضم موضوعات جيولوجية متعددة يجذب انتباه وحماس القارئ، ويضيف إلى معلوماته العلمية يمثّل تحديا كبيرا للقائمين به . ولنكون مطمئنين لتناسب هذا المحتوى العلمى المتنوع مع قدرات القراء سواء كانوا طلابا أو باحثين عن المعرفة بشكل عام طلبنا من الزملاء المتخصصين فى مختلف التخصصات التى يناقشها الكتاب بمراجعة فصول الكتاب كل فى مجال تخصصه ، حتى يظهر الكتاب بالشكل المطلوب وبالدقة العلمية واللغوية المنشودة . ونعرض فيما يلى مختصرا بفصول الكتاب مع توجيه شكر خاص وعرفان بالجميل لكل من هؤلاء الأساتذة الزملاء الأعزاء الذين نعتز بآرائهم ومقترحاتهم التى ساهمت كثيرا فى أن يظهر الكتاب بصورته الحالية .

الفصل الأول: ويتناول مقدمة عامة توضح ميكانيكية عمل الأرض وعرضًا مختصرًا لنظرية تكتونية الألواح التى تفسر الآن مختلف العمليات الجيولوجية التى تجرى على الأرض . وقد قام بمراجعة هذا الفصل أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن أستاذ الجيولوجيا بهيئة المواد النووية .

الفصل الثانى: ويهتم بدراسة المعادن وتركيبها الكيميائى وتركيبها الذرى وطرق تصنيفها وخواصها الفيزيائية ، بالإضافة لاستخدام المعادن كأدلة على بيئات التكوين. وقد قام بمراجعته أ.د. محمد عبد الحميد الشرقاوى أستاذ المعادن بكلية العلوم - جامعة القاهرة

الفصل الثالث: ويهتم بدراسة أنواع الصخور الثلاثة: النارية والرسوبية والمتحولة ، مع التركيز على دورة الصخور التى تحكم ميكانيكية تكوّن أحدها من الآخر. وقد قام بمراجعته د. على فراج عثمان أستاذ مساعد الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الرابع: ويتناول دراسة الصخور النارية وأنواعها وكيفية تكوّن الصهارات ومواضعها وأشكال المتداخلات الصهارية وعلاقة الصخور النارية بتكتونية الألواح. وقد قام بمراجعته د. على فراج عثمان أستاذ مساعد الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الخامس: ويقوم على دراسة البراكين وأنواع المواد الناتجة عنها والظواهر البركانية المختلفة ، والمخاطر الناجمة عن ثورات البراكين وطرق تجنب آثارها المدمرة . وقد قام بمراجعته أ. د. باهر عبد الحميد القليوبى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل السادس: ويتضمن دراسة لعمليات التجوية والتعرية باعتبارها وسيلة أساسية لهدم الصخور وتفتيتها كمقدمة لتكوين الصخور الرسوبية . وقد قام بمراجعته أ. د. عبد المحسن عثمان زيكو أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة الزقازيق.

الفصل السابع: ويتناول الصخور الرسوبية وأنواعها وبيئات ترسيبها والتراكيب الرسوبية المختلفة. وقد قام بمراجعته أ. د. محمد محمود أبو زيد أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الثامن: ويتناول الصخور المتحولة وأنواعها والعوامل المؤثرة فى تكوينها وأنسجتها وعلاقتها بتكتونية الألواح . وقد قام بمراجعته أ. د. باهر عبد الحميد القليوبى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل التاسع: ويقوم على دراسة تاريخ الأرض وطرق قياس الأعمار الجيولوجية نسبية أو مطلقة

وكيف بنى العمود الجيولوجى والتصنيف الطبقى للصخور . وقد قام بمراجعته أ. د. عبد المحسن عثمان زيكو أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة الزقازيق.

الفصل العاشر: ويهتم بدراسة مراحل تشوه الصخور وأنواع التشوهات مثل الطيات والصدوع وغيرها وميكانيكية حدوث تلك التشوهات . وقد قام بمراجعته أ. د. عادل رمضان مصطفى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الحادى عشر: ويتناول الانهيال الكتلى وأسباب تحرك الكتل والعمليات التى تؤدى إلى حدوث ذلك ، وأنواع الانهيالات ، ووسائل تجنب المخاطر الناشئة عنها . وقد قام بمراجعة هذا الفصل أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن أستاذ الجيولوجيا بهيئة المواد النووية .

الفصل الثانى عشر: ويهتم بدراسة دورة الماء فى الطبيعة والمجارى المائية وأنواعها ، وأنظمة الصرف المختلفة ونشأة وتطور نهر النيل . وقد قام بمراجعته أ.د. محمود محمد عاشور الأستاذ بقسم الجغرافيا بكلية الآداب - جامعة عين شمس .

الفصل الثالث عشر: ويحتوى على دراسة المياه الجوفية وظروف تكونها ونوعياتها والعمل الجيولوجى لها . وقد قام بمراجعته أ.د. إبراهيم زكريا الشامى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة حلوان.

الفصل الرابع عشر: ويتناول دراسة المثالج والظروف الجيولوجية التى تؤدى إليها وتؤثر عليها وأسباب حدوث التثلج فى العصور الجليدية . وقد قام بمراجعته أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد النووية .

الفصل الخامس عشر: ويحتوى على دراسة الرياح والصحارى والعمل الجيولوجى لكل منها وظاهرة التصحر وطرق مقاومتها . وقد قام بمراجعته أ.د. محمود محمد عاشور الأستاذ بقسم الجغرافيا بكلية الآداب - جامعة عين شمس.

الفصل السادس عشر: ويتناول دراسة الزلازل ونشأتها وتوزيعها وطرق توقعها ، واستخدام الزلازل فى التعرف على التركيب الداخلى للأرض . وقد قام بمراجعته أ. د. مهدى عبد الرحمن قرطام أستاذ الجيوفيزياء بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل السابع عشر: ويتناول تكتونية الألواح وتتبع الفكر الجيولوجى حتى ظهور تلك النظرية التى ساهمت فى تفسير الكثير من العمليات الجيولوجية . كما نوقشت طبيعة الحدود الفاصلة بين الألواح وحركتها وعلاقتها بالرواسب المعدنية . وقد قام بمراجعته أ. د. عادل رمضان مصطفى أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس .

الفصل الثامن عشر: ويتناول تكتونية القشرة الأرضية وعمليات بناء الجبال وخسف القارات والحركات الرأسية الإقليمية . وقد قام بمراجعته أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد النووية .

الفصل التاسع عشر: ويتناول مصادر الطاقة وأنواعها والمصادر البديلة لها والثروة المعدنية وأصلها وعلاقتها بتكتونية الألواح . وقد قام بمراجعته أ.د. محمود يسرى زين الدين أستاذ الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة الأزهر و أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد النووية .

ويطيب لنا أن نتقدم بشكر خاص إلى الأستاذ الدكتور/ ممدوح عبد الغفور حسن الأستاذ بهيئة المواد النووية لمراجعته متن الكتاب وملاحظاته القيمة . كما نشكر الدكتور/ ضياء الدين محمد كامل والدكتور/ ثروت حلمى عبد الحفيظ والدكتور / إسلام محمد درغام المدرسون بقسم الجيولوجيا – جامعة الأزهر لما قدموه من دعم فى إعداد وتصوير العينات الصخرية وبعض الأشكال التوضيحية الواردة فى الكتاب . كما نتقدم بالشكر للدكتور/ على فراج عثمان أستاذ مساعد الجيولوجيا بكلية العلوم - جامعة عين شمس على المجهود الذى بذله فى إعداد المواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت) التى يمكن الاطلاع عليها لمزيد من المعلومات حول الموضوع الذى يعالجه كل فصل من فصول الكتاب .

المؤلفان

يناير 2007م

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ إِنَّمَا يَخۡشَى ٱللَّهَ مِنۡ عِبَادِهِ ٱلۡعُلَمَٰٓؤُاْۗ ﴾

صدق الله العظيم

(سورة فاطر : 28)

المحتويات

الفصل الأول

مقدمة

الفصل الثانى

المعادن : الوحدة البنائية للصخور

الفصل الثالث

الصخور : سجل العمليات الجيولوجية

الفصل الرابع

الصخور النارية

الفصل الخامس

البراكين

الفصل السادس

التجوية والتعرية

الفصل السابع

الرواسب والصخور الرسوبية

الفصل الثامن

الصخور المتحولة : صخور جديدة من أخرى سابقة

الفصل التاسع

الزمن الجيولوجى

الفصل العاشر

تشوه الصخور : الطيات والصدوع

وتراكيب أخرى كسجل لتشوه الصخور

الفصل الحادى عشر

الانهيال الكتلى

الفصل الثانى عشر

دورة الماء والأنهار

الفصل الثالث عشر

المياه الجوفية

الفصل الرابع عشر

المثالج : عمل الجليد

الفصل الخامس عشر

الرياح والصحارى

الفصل السادس عشر

الزلازل وتركيب الأرض

الفصل السابع عشر

تكتونية الألواح : نظرية شاملة

الفصل الثامن عشر

تكتونية القشرة القارية وسلاسل الجبال

الفصل التاسع عشر

مصادر الطاقة والثروة المعدنية

الفصل 1

مقـــدمة

I. أصل النظام الكوكبى :

أ - الفرضية السديمية

ب - نشأة الكواكب

II. تطور كوكب الأرض :

أ - تمايز الأرض

ب - أغلفة الأرض مختلفة التركيب الكيميائى

جـ - أغلفة الأرض مختلفة الخصائص الفيزيائية

د - نشأة القارات والمحيطات والغلاف الجوى

III. ديناميكية عمل كوكب الأرض: الأرض دائبة الحركة :

أ - نظرية الكوارث ومبدأ الوتيرة الواحدة

ب - تكتونية الألواح: نظرية شاملة لعلم الجيولوجيا :

1 - حركات الألواح

2 - حدود الألواح

IV. التفاعلات بين طبقات الأرض الداخلية والخارجية

الأرض هى المكان الوحيد فى الكون المعروف – حتى الآن – الذى يضم أكثر من مليون صورة من صور الحياة بما فيها الإنسان ، كما أنه لم يُكتشف حتى الآن كوكب آخر له الاتزان الدقيق نفسه بين الظروف الضرورية للمحافظة على الحياة . **والجيولوجيا (علم الأرض) Geology** هو العلم الذى يدرس نشأة كوكب الأرض وطريقة تطوره وميكانيكية عمله وطرق المحافظة عليه . وقد اشتق مصطلح الجيولوجيا من اللفظ اليونانى geo بمعنى أرض ، وlogia بمعنى دراسة أو علم . ويعرف العلماء المختصون بدراسة الأرض باسم "الجيولوجيون "geologists .

ويعمل الجيولوجيون بكل جد لمحاولة فهم العمليات التى تدور على الأرض وأيضا فهم تاريخها الطويل المعقد ، بالبحث فى مختلف المواقع من القمم المغطاة بالثلوج حتى أعماق المحيطات مرورا بالبراكين النشطة . ويولى الجيولوجيون اهتماما خاصا لمكونات الأرض التى تتأثر بنشاط الإنسان كالأنهار ، وكذلك العمليات التى تسبب الكوارث الطبيعية مثل الثورات البركانية والزلازل . ويقوم الجيولوجيون بدراسة المعالم الجيولوجية الظاهرة مباشرة ، كما يعتمدون على الملاحظات غير المباشرة فى فحص الأماكن التى لا يستطيعون الوصول إليها من خلال حفر الآبار العميقة أو تسجيل الموجات الصادرة عن اهتزازات الزلازل والبراكين ، مثل الطبيب الذى يعتمد على الأصوات التى تصل إليه عبر سماعة الكشف لتعرف ما يدور داخل أجسامنا . ويعمل الجيولوجيون أيضا على التنبؤ بمواقع حقول البترول الجديدة وتواجدات الرواسب المعدنية والخامات وكذلك المياه الجوفية فى باطن الأرض . كما يقوم الجيولوجيون باستخدام الطرق العلمية الحديثة فى دراسة البيئة التى نعيش فيها ، والعوامل المختلفة التى تؤثر فيها .

وتنقسم الجيولوجيا إلى قسمين رئيسيين لكل منهما أهدافه ، مع ارتباط هذه الأهداف ببعضها البعض، وهما الجيولوجيا الفيزيائية والجيولوجيا التاريخية . أما **الجيولوجيا الفيزيائية physical geology** فتهتم بدراسة : (1) العمليات التى تعمل على سطح الأرض أو تحته و(2) المواد التى تشملها وتؤثر فيها تلك العمليات . ومن العمليات الجيولوجية النشاط البركانى وأسبابه والزلازل والانهيارات الأرضية والفيضانات . ومن المواد المهمة التى يدرسها هذا العلم التربة والرمال والصخور والهواء وماء البحار .

أما **الجيولوجيا التاريخية historical geology** فتهدف إلى تأريخ وترتيب الأحداث الجيولوجية سواء

المتصلة بفيزياء الأرض أو الحياة ، والتى حدثت فى الماضى . وتبحث الجيولوجيا التاريخية فى الإجابة عن أسئلة تتعلق بتاريخ الأرض مثل : متى تكون كوكب الأرض عموما ، ومتى تكونت المحيطات، ومتى نشأت الحياة ، ومتى ظهرت الديناصورات لأول مرة ، ومتى تكونت جبال البحر الأحمر فى الصحراء الشرقية بمصر، ومتى وأين ظهرت الأشجار لأول مرة ؟ . ومن أهم الإسهامات التى قدمها علم الجيولوجيا التاريخية للمعرفة الإنسانية **مقياس الزمن الجيولوجى geologic time scale** ، حيث تم وضع تقويم زمنى لعمر الأرض الذى يبلغ 4600 مليون سنة ، كما وضع على هذا التقويم الأحداث الجيولوجية حسب ترتيبها الزمنى الصحيح(شكل 1-1) .

وتعتبر الجيولوجيا الفيزيائية - وهى موضوع هذا الكتاب - نقطة البداية فى دراسة الأرض وهى البيئة التى تحيط بنا ، لنكون قادرين على التنبؤ بالتغيرات التى يمكن أن تحدث فيها مستقبلا ، مما يحتم ضرورة فهم ميكانيكية عمل الأرض ودراسة المواد التى تكوّنها خاصة المعادن والصخور والعمليات التى تؤثر فيها .

ولفظ صخر مصطلح مهم ، سيستخدم كثيرا فى هذا الكتاب ، ولذلك تعين تعريفه بدقة وتفصيل . **فالصخر rock** كل مادة صلبة متماسكة غير حية تكونت طبيعيا من معدن واحد أو من خليط من عدة معادن ، وتكون جزءا من كوكب . ويجب ملاحظة أن التعريف يشير إلى تجمع متماسك بمعنى أن كل حبيبات الصخر يجب أن تكون متلاحمة ومتداخلة مع بعضها بعضا لتكون كتلة صلبة . فحبيبات الرمل غير المتماسكة الموجودة على شواطئ مدينة الإسكندرية بمصر مثلا ليست صخرا ، حيث أن حبيباتها غير متماسكة وغير متداخلة مع بعضها بعضا. كما إن أى مادة حية كالأشجار مثلا لا تعتبر صخورا أيضا ، على الرغم من كونها مادة صلبة ، بينما يعتبر الفحم من الصخور ؛ نظرا لأنه يتكون من مكونات نباتية كالأوراق والسيقان وغيرها، ميتة ومنضغطة ومتماسكة .

ا - أصل النظام الكوكبى

يعود البحث فى أصل الكون عموما وكوكب الأرض خصوصا إلى الأساطير القديمة المدونة . ويعتمد التفسير العلمى المقبول اليوم لأصل الكون على نظرية الداوية الكبرى (الانفجار العظيم) Big Bang Theory ، والتى تنص على أن الكون بدأ منذ حوالى 10 إلى 15 بليون سنة من انفجار كونى هائل ، حيث كانت كل المادة والطاقة منضغطة فى نقطة واحدة كثيفة قبل لحظة الانفجار. وبالرغم من أننا نعرف القليل عما حدث فى جزء من الثانية التى بدأ فيها الانفجار ، فقد حاول الفلكيون فهم ما حدث للكون خلال بلايين السنين التالية . ولكن بصورة عامة ، فقد بدأ الكون ومازال يتمدد بصفة مستمرة ليكوّن المجرات galaxies والنجوم stars . ويركز الجيولوجيون دراساتهم على الأربعة ونصف بليون سنة الأخيرة من هذا المدى الزمنى الواسع ، حيث تكوّن نظامنا الشمسى من نجم الشمس والكواكب الثمانية التى تدور حوله . ويؤدى فهمنا لكيفية تكوّن النظام الشمسى بالتالى إلى فهم أصل الأرض وطريقة تكونها .

دهر Eon	حقب Era	عصر Period	حين Epoch	العمر م. س.	تطور النباتات والحيوانات
الحياة الظاهرة Phenerozoic	الحياة الحديثة Cenozoic	الرابع	الهولوسين	0.01	ظهور الإنسان
			البليستوسين	1.8	
		الثالث	البليوسين	5.3	عصر الثدييات
			الميوسين	24	
			الأوليجوسين	37	
			الأيوسين	58	انقراض الديناصورات والعديد من الأنواع الأخرى
			الباليوسين	65	
	الحياة الوسطى Mesozoic	الطباشيرى	عصر الزواحف	135	ظهور النباتات الزهرية
		الجوراسى		180	ظهور الطيور
		الترياسى		225	سيادة الديناصورات
	الحياة القديمة Paleozoic	البرمى	عصر البرمائيات	265	بداية الزواحف
		الكربونى		345	مستنقعات الفحم الضخمة ، انتشار البرمائيات
		الديفونى	عصر الأسماك	400	بداية الحشرات – سيادة الأسماك
		السيلورى		430	بداية النباتات القارية
		الأوردوفيشى	عصر اللافقاريات	500	بداية الأسماك
		الكمبرى		570	سيادة ثلاثية الفصوص بداية الكائنات الهيكلية
البروتيروزوى Proterozoic	Precambrian يطلق عليه ما قبل الكمبرى ويشمل 87% من عمر الأرض			2500	بداية الكائنات عديدة الخلايا
الأركى Archaean				3800	بداية الكائنات وحيدة الخلايا ، أقدم الصخور
الهاديان Hadean				4600	نشأة الأرض

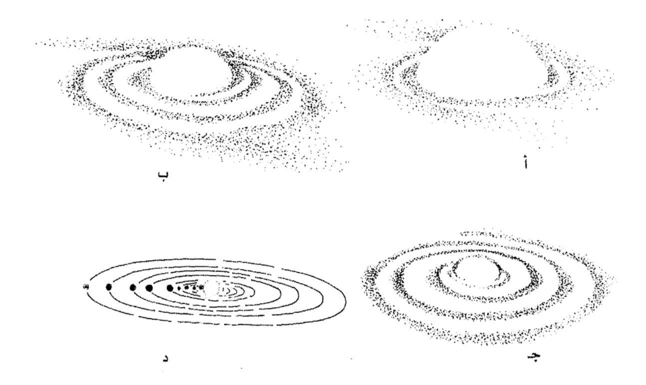
شكل (1.1): مقياس الزمن الجيولوجي geologic time scale ، وتمثل الأعداد العمر مقدرا بملايين السنين قبل الآن (Ma). يشمل دهر الحياة الظاهرة (زمن الحياة الظاهرة) حقب الحياة القديمة ، وحقب الحياة الوسطى وحقب الحياة الحديثة. ويشمل زمن ما قبل الكمبرى الأقدم دهر البروتيروزوى (زمن الحياة البدائية) ، ودهر الأركى (زمن الحياة القديمة) ، ودهر الهاديان (ما قبل الزمن الجيولوجى) الذى لا يوجد سجل صخرى له.

أ - الفرضية السديمية

إن الهدف الأساسى لكل العلوم هو التوصل إلى كيفية تكوّن الكون بدقة . ولتفسير الظواهر المختلفة يقترح العلماء فرضياتhypotheses يعتمدون فيها على التجارب والمشاهدات ، ثم يقدمونها إلى المجتمع العلمى لتخضع لمزيد من الدراسات والاختبارات . وإذا صمدت الفرضية أمام الاختبارات العلمية فإنها ترقى إلى مستوى النظريةtheory . ولاتصبح النظرية مسلما بها إلى الأبد، على الرغم من أنها قد تكون اكتسبت بعض القوة بمرور الوقت ، حيث إن جوهر العلم يقوم على عدم استثناء أى نظرية من المراجعة المستمرة . وإذا ظهر دليل أو برهان جديد يوضح خطأ النظرية ، قام العلماء بتعديلها أو حتى إلغائها من الأساس. وكلما صمدت النظرية أمام التحديات العلمية زادت مصداقيتها. وبالتالى فإن الفرضية هى خطوة بدائية تسبق النظرية التى تخضع لكثير من النقد والتمحيص.

وسنناقش أصل كوكب الأرض فى ضوء الفرضية السديمية . حيث اقترح الفيلسوف الألمانى إيمانويل كانت Immanuel Kant فى عام 1755 م أن أصل المجموعة الشمسية يرجع إلى التصادم الحادث بين مكونات مادة سحابة دوارة من الغازات والرماد الدقيق . وقد أدت الاكتشافات التى توصل إليها العلماء فى العقود الأخيرة من القرن العشرين إلى عودة الفلكيين إلى الفكرة القديمة والمساة بالفرضية السديمية **nebular hypothesis** ، حيث أظهرت التليسكوبات الحديثة أن الفضاء خارج المجموعة الشمسية ليس فراغا كما كان يظن سابقا. ولقد سجل الفلكيون عديدًا من السحب المماثلة لتلك التى اقترحها الفيلسوف كانت ، وسميت تلك السحب بالسُدُمnebulae (جمع سَدِيم) . كما اكتشف الفلكيون أن هذه السحب تتكون من غازات معظمها هيدروجين (H) وهيليوم (He) ، بالإضافة لرماد دقيق الحجم يشبه كيميائيا المواد التى نجدها على الأرض.

ثم بدأت المرحلة الأولى فى نمو هذا الكوكب منذ حوالى 4.6 بليون سنة مضت حين تكونت سحابة كروية دوارة من الغازات والثلج والرماد (شكل 2.1 أ). وقد أدت الجاذبية التى أثرت على المواد الموجودة داخل هذه السحابة إلى تقارب الحبيبات من بعضها البعض ، مما أدى إلى انكماش المادة إلى الداخل وقلة حجم السحابة ، وبالتالى زيادة سرعة دورانها (كما يحدث للمتزلج على الجليد حيث تزداد سرعة دورانه حول نفسه عندما يضم ذراعيه للداخل) ، ثم أخذت السحابة شكلا مسطحا كالقرص (شكل 2.1 ب) . وقد أدى تحرك المادة نحو المركز وزيادة كثافتها إلى تكون الشمس الابتدائيةprotosun ، وهى المادة التى تكونت منها الشمس الحالية (شكل 2.1 ج) ، كما أدى زيادة حجم الكتلة المركزية للشمس الابتدائية التى أصبحت كثيفة إلى ارتفاع حرارتها الداخلية إلى ملايين الدرجات المئوية ، ثم بدأت عملية الاندماج النووى nuclear fusion . وفى عملية الاندماج النووى تتحد (تندمج) ذرات الهيدروجين تحت الضغط الشديد والحرارة المرتفعة لتكوّن غاز الهيليوم مع تحول قدر



شكل (2.1): فرضية أصل النظام الشمسى : الفرضية السديمية Nebular hypothesis .

(أ) تتكون فى البداية سحابة كروية ضخمة دوارة من الثلج والغاز وبقية أشكال الحطام .

(ب) تنكمش هذه الكتلة سريعة الدوران لتكون قرصا مفلطحا ، له مركز كروى عالى الكثافة ، والذى تنشأ منه الشمس الابتدائية protosun.

(جـ) تنشأ الكواكب الابتدائية وتنمو نتيجة اصطدام الكتل الصغيرة أو الجسيمات الكوكبية Planetesimals والتحامها بعضها ببعض .

(د) تدور الكواكب حول الشمس الملتهبة ، وتكون الأرض هى الكوكب الثالث الدوار حول الشمس .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ضئيل من الكتلة إلى طاقة أثناء العملية . ونحن نشعر فوق سطح الأرض بذلك التحول على هيئة إشعاع شمسى .

ب - نشأة الكواكب

على لرغم من تركز معظم مادة السديم الأصلى فى الشمس الابتدائية ، فإن هناك قرصا من الغاز والغبار يسمى بالسديم الشمسى solar nebula بقى مغلفا لها . وقد أصبح السديم الشمسى ساخنا نتيجة تحوله إلى قرص أجزائه الداخلية أكثر سخونة وكثافة عن الأجزاء الخارجية الأقل كثافة وحرارة نتيجة تجمع معظم المادة فيه . وعندما يبدأ هذا القرص فى التبرد يتكثف عديد من الغازات ، أى تتحول إلى الحالة السائلة أو الصلبة ، ويتصلب الماء ويتحول إلى جليد عند التبريد إلى درجة أقل من درجة التجمد . وقد أدت الجاذبية التثاقلية إلى تصادم مكونات الغبار والمواد المتكثفة ببعضها بعضا ، ثم تجمعت وتلاحمت على هيئة

جسيمات صغيرة مكتنزة تعرف بالجسيمات الكوكبية planetesimals . وحين تتصادم هذه الجسيمات الكوكبية وتلتحم بعضها ببعض، فقد تتكون أجسام أكبر حجما تقرب من حجم القمر (شكل 2.1 ج) . وفى المرحلة النهائية من هذا التصادم والاندماج المفاجئ العنيف ، تجرف الأجسام الكبيرة الأجسام الأخرى نتيجة للجاذبية التثاقلية الكبيرة لها ، لتتكون الكواكب الثمانية التى تسير فى مداراتها الحالية ، وهى الكواكب المكونة لمجموعتنا الشمسية (شكل 2.1 د) . وتدل الحسابات النظرية أن معظم هذا النشاط قد حدث فى وقت قصير يقدر بأقل من مائة مليون سنة بدأت قبل نحو 4.5 بليون سنة . ويعتمد حساب ذلك التاريخ على عمر النيازك التى تصطدم أحيانا بالأرض ، والتى يعتقد أنها جزء من بقايا المكونات التى تكونت فى ذلك الزمن البعيد .

وتدور بعض الكواكب بعد تكونها فى مدارات قريبة من الشمس ، بينما يدور البعض الآخر فى مدارات بعيدة عن الشمس . ولذلك تختلف طريقة تطور الكواكب الأقرب من الشمس عن تلك الموجودة فى مدارات أبعد عنها . وعلى عكس الكواكب الخارجية ، فإن الكواكب الداخلية inner planets الأربعة الأقرب إلى الشمس وهى عطارد Mercury والزهرة Venus والأرض Earth والمريخ Mars تكون شبيهة بكوكب الأرض ، ولذلك تعرف أيضا بالكواكب الأرضية terrestrial planets (كلمة terra اللاتينية تعنى الأرض) . وتكون هذه الكواكب صغيرة وصخرية لأنها تكونت تحت درجة حرارة عالية ، إلى الحد الذى لا يمكنها أن تحتفظ بكميات كبيرة من المواد المتطايرة (وهى المواد التى تتحول إلى غازات وتهرب عند درجات حرارة منخفضة نسبيا) . وقد تسبب الإشعاع والمواد المتدفقة من الشمس فى هروب معظم الهيدروجين والهيليوم والماء والغازات الخفيفة الأخرى والسوائل تاركة الفلزات الثقيلة مثل الحديد وباقى المواد الثقيلة المكونة للصخور حول الكواكب الداخلية. وقد نشأت هذه الكواكب الداخلية منذ نحو 4.5 بليون سنة ككتل صخرية كثيفة .

وحسب التسلسل السابق ، فإن معظم المواد الطيارة قد اندفعت من منطقة الكواكب الأرضية إلى الأجزاء الخارجية الباردة من المجموعة الشمسية ، حيث تكونت الكواكب الخارجية outer planets العملاقة وهى: المشترى Jupiter وزحل Saturn وأورانوس Uranus ونبتون Neptune والأقمار المصاحبة لها . وقد كانت هذه الكواكب كبيرة الحجم ، كما كانت جاذبيتها قوية بحيث استطاعت الاحتفاظ بالمكونات السديمية الأخف . لذلك ، وعلى الرغم من أن الكواكب الخارجية لها لب صخرى مثل الشمس ، إلا أنها تتكون فى معظمها من الهيدروجين والهيليوم وغيرها من المكونات الخفيفة التى ورثتها من السديم الأصلى . هذا ، وقد ناقش الاتحاد الدولى للفلك (International Astronomical Union) فى اجتماعه فى 24 أغسطس 2006م إخراج بلوتو من زمرة

كواكب المجموعة الشمسية ، وذلك لصغر حجمه الذى يخرجه عن التعريف الجديد للكوكب ، وهو أنه "أى جرم سماوى يدور حول الشمس وله كتلة تكفى لأن يصبح دائرى الشكل ، وأفرغ المنطقة حول مساره". وبسبب القوة المحدودة لبلوتو Pluto فلا يستطيع التغلب على نبتون القريب منه والذى يقطع مداره ، ويفرغه من أجرام عديدة فى حجم بلوتو ، إلا أن هذا الأمر لم يتقرر بشكل نهائى حتى الآن . وتعرف هذه الكواكب الخارجية بالكواكب الجوبيترية Jovian planets وهو اسم مستمد من Jove وهو اسم آخر لجوبيتر Jupiter كبير آلهة الرومان.

II – تطور كوكب الأرض

كيف تطورت الأرض من كتلة صخرية إلى كوكب حى به قارات ومحيطات وغلاف جوى ؟. وتكمن الإجابة على هذا السؤال فى عملية التمايز **differentiation** – وهى تحول الأرض من كتلة تتكون من مواد مختلطة بعضها ببعض بطريقة عشوائية إلى جسم مقسم من الداخل إلى أغلفة متحدة المركز تختلف عن بعضها فيزيائيا وكيميائيا. وقد حدث التمايز مبكرا فى تاريخ الأرض ، حيث كان كوكبا ساخنا إلى الحد الذى أدى إلى صهر مكوناته. وقد اصطدمت الأرض عند بداية تكونها بجسيمات كوكبية وأجسام أخرى أكبر. ومن المعروف أن الجسم المتحرك يحمل كمية كبيرة من طاقة الحركة (علينا أن نتذكر كيف تؤدى طاقة الحركة إلى تحطم سيارة عند وقوع حادثة ما) . وقد أدت هذه الاصطدامات إلى تحول معظم طاقة الحركة إلى حرارة ، وهى صورة أخرى من صور الطاقة . ويعتقد أن اصطدام جسم فى حجم كوكب المريخ مع الأرض بسرعة كبيرة قد أدى إلى خروج طاقة هائلة تكفى لدفع كمية كبيرة من الحطام فى الفضاء ، كما انطلقت كمية من الحرارة تكفى لأن ينصهر معظم ما تبقى من مادة ليكون كوكب الأرض الابتدائى .

ويعتقد العلماء الآن أن هذا التغير العنيف قد حدث فعلاً ولم يؤد إلى الانصهار التام فقط ، بل تسبب فى تكون القمر moon ، حيث أدى الاصطدام الهائل إلى تكون وابل من الحطام أتى من الأرض ومن الجسم المرتطم فى الفضاء ليتكون القمر من هذا الحطام بعد إعادة تشكيله كجسم منصهر كبير . كما أدى هذا الارتطام الكبير إلى انحراف محور دوران الأرض بحوالى 23° عن الوضع الرأسى بالنسبة لمستوى المدار إلى المحور المائل الحالى ، بالإضافة إلى زيادة سرعة دوران الأرض . وقد ثبت من دراسة الصخور التى جمعتها مركبة الفضاء أبوللو من القمر أن عمر صخور القمر يقدر بحوالى 4.44 بليون سنة ، وهو ما يقرب من زمن الارتطام العنيف . وإذا كانت تلك الفرضية صحيحة ، فإن عمر الأرض يتراوح بين العمر المقدر للنيازك وهو 4.56 بليون سنة وعمر صخور القمر.

وبالإضافة إلى ذلك ، فلابد من وجود مصدر يضيف للأرض حرارة باستمرار ؛ حيث يوجد ضمن العناصر الكيميائية الكثيرة فى الأرض عدد من العناصر التى تتميز بالقدرة على الإشعاع الطبيعى ، بمعنى أنها

تتحول تلقائياً إلى عناصر أخرى وتطلق كميات من الجسيمات والطاقة الحرارية . ومن أمثلة ذلك عناصر اليورانيوم والثوريوم اللذان يتحولان إلى رصاص، وتنطلق كميات ضئيلة من الحرارة فى كل مرة يحدث فيها هذا التحول الإشعاعى . ولذلك ، فقد استمر النشاط الإشعاعى فى رفع درجة حرارة الأرض حتى فى الأوقات التى قلت فيها تصادمات النيازك .

أ – تمايز الأرض

بدأت الأرض فى الانصهار نتيجة للعوامل السابقة ، كما بدأت عملية التمايز أيضا (شكل 3.1) ، بأن صعدت المواد المنصهرة الأخف وزنا ناحية السطح ، وهى مواد غنية بالسيليكون والألومنيوم والصوديوم والبوتاسيوم . ولا تزال الصخور الموجودة عند سطح الأرض غنية فى تلك العناصر ، بينما غاصت المواد المنصهرة ذات الكثافة الأعلى ، مثل الحديد المنصهر إلى مركز الأرض ، وهربت المواد الطيارة على هيئة غازات عبر البراكين. وكونت تلك الغازات الهاربة الغلاف الجوى لكوكب الأرض ، والتى تشتمل أساسا على بخار الماء وثانى أكسيد الكربون والميثان وربما الأمونيا . كما نشأ ماء المحيطات من المواد الطيارة أيضا . وأدت عملية التمايز إلى تغير الأرض من كوكب متجانس أصلاً إلى كوكب مكوّن من أغلفة مختلفة فى التركيب والخواص الفيزيائية.

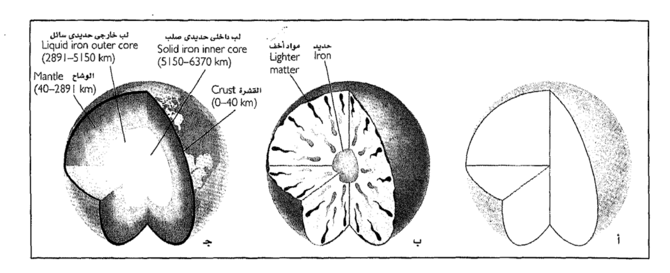
ب – أغلفة الأرض مختلفة التركيب الكيميائى

تنقسم الأرض إلى ثلاثة أغلفة مختلفة فى التركيب الكيميائى (شكل 3.1) . ويسمى الغلاف الداخلى جهة المركز باللب **core** وهو أكثر الأغلفة الثلاثة كثافة. واللب عبارة عن كتلة تتكون أساسا من فلز الحديد ، بالإضافة إلى كميات قليلة من النيكل وعناصر أخرى .

ويطلق على الغلاف السميك المحيط باللب والمكون من مواد صخرية كثيفة الوشاح **mantle** ، وهو أقل كثافة من اللب ، ولكن أكبر كثافة من الغلاف الذى يليه للخارج . ويوجد فوق الوشاح الغلاف الأقل سمكا وهو القشرة **crust** ، والتى تتكون من مادة صخرية أقل كثافة من صخور الوشاح الموجود أسفلها.

ويوضح شكل (3.1) أن اللب والوشاح سمكهما ثابت تقريباً . أما القشرة فتكون غير منتظمة السمك ، حيث يبلغ متوسط سمك القشرة المحيطية **oceanic crust** حوالى 8 كم بينما يبلغ متوسط سمك القشرة القارية **continental crust** نحو 45 كم ، ويتراوح بين 30 و 70 كم .

وعلى الرغم من أننا لا نستطيع رؤية أو أخذ عينات من اللب أو الوشاح ، إلا أنه يمكننا عن طريق قياس السرعات التى تسير بها الموجات الزلزالية عبر الأرض أن نعرف أن كوكب الأرض الصلب ليس له تركيب متجانس ، وأن الأرض تتكون من عدة أغلفة ذات كثافات مختلفة . ويمكن تحديد تركيب الأغلفة المختلفة للأرض من معرفة كثافتها . وتوضح العينات التى



شكل (3.1): نشأة أغلفة الأرض.

(أ) تكونت الأرض في البداية كجسم متجانس، دون قارات أو محيطات.

(ب) بدأت عملية التمايز differentiation، غاص الحديد إلى مركز الأرض السائل، بينما طفت المواد الأقل كثافة إلى السطح لتكون القشرة.

(جـ) تمايز كوكب الأرض في النهاية إلى ثلاثة أغلفة، هي: لب core عالى الكثافة مكوّن من الحديد وقشرة crust تتكون من صخور أقل كثافة، ووشاح mantle بينهما.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

أخذت من القشرة أنها مختلفة في التركيب عن الوشاح. أي أن التركيب الكلي للقشرة، وكذلك الكثافة تختلف عن تلك التي قدرت للوشاح.

كما لوحظ أن تحديد تركيب لب الأرض أكثر صعوبة، وذلك يرجع إلى أن درجات الحرارة تكون عالية، كما يكون الضغط مرتفعا إلى حد أنها تغير من الخصائص التي نعرفها للمواد. وتأتي بعض الأدلة المهمة المتعلقة بتركيب لب الأرض من النيازك الحديدية، حيث يعتقد أن تلك النيازك وهي فتات من لب كوكب أرضي صغير تفتت بسبب تصادم ضخم حدث مبكرا في تاريخ النظام الشمسي، وأن هذا الكوكب المفتت كان مقسما إلى أغلفة ذات تركيب مشابه لتلك الموجودة في الأرض وباقي الكواكب الأرضية.

ج - أغلفة الأرض المختلفة الخصائص الفيزيائية

لا يتمايز كوكب الأرض إلى لب ووشاح وقشرة بناءً على تركيبه الكيميائي فقط، وإنما يتمايز بناءً على الخواص الفيزيائية لمكونات أغلفته، مثل شدة الصخر strength (أقصى إجهاد يتحمله جسم صلب دون أن يتمزق أو يتشوه تشوها لدنا)، والحالة الصلبة مقابل الحالة السائلة. وتتحكم درجات الحرارة والضغط بدرجة كبيرة في تغير الخواص الفيزيائية أكثر من تحكمها في التركيب الصخري. ومن الجدير بالذكر أن الحدود التي تتغير عندها الخواص الفيزيائية للأرض لا تتطابق بالضبط مع الحدود، التي يتغير عندها التركيب عند الحدود الفاصلة بين القشرة والوشاح واللب.

اللب الداخلى والخـارجى: ينقـسم لـب الأرض إلى قسمين أحدهما داخلى والآخر خارجى (شـكل 3.1) . أما **اللب الداخلى inner core** فتكون الـضغوط فيـه كبيرة لدرجة أن معدن الحديد المكوّن له يكون فى حالـة صلبة ، على الرغم من درجة حرارته المرتفعة . ولذا فإن مركز الأرض يكون صلبا، ويرجع السبب فى ذلـك إلى أن الحرارة التى تبدأ عندها المادة فى الانصهار تزداد مـع زيـادة الـضغط . أمـا **اللـب الخـارجى outer core** فيحيط باللب الداخلى ، وفيه يتوازن الضغط مع درجـة الحرارة مما يؤدى إلى أن يكون الحديد المكوّن له فى الحالة السائلة . ويتضح مما سبق أن اللبين الداخلى والخـارجى يكونـــان متفقـــين فى التركيـــب ومختلفـــين فى الحالــــة الفيزيائية، حيث يكون اللب الداخلى فى الحالـة الـصلبة بينما يكون اللب الخارجى فى الحالة السائلة.

الغـلاف الأوسـط (الميزوسـفير) : تـتحكم درجـة الحرارة والضغط فى شدة الجسم الصلب. فعند تـسخين جسم صلب فإنه يفقد شدته ، بينما تؤدى زيادة الضغط لزيادة الشدة (الصلابة) . ويقسم الوشاح والقشرة بنـاءً على درجة الحرارة والـضغط إلى ثـلاث منـاطق مختلفـة الشدة ، هى من الداخل إلى الخارج : الغلاف الأوسـط (الميزوســفير) والغـــلاف اللـــدن (الأسثينوســـفير) والغلاف الصخرى (الليثوسفير).

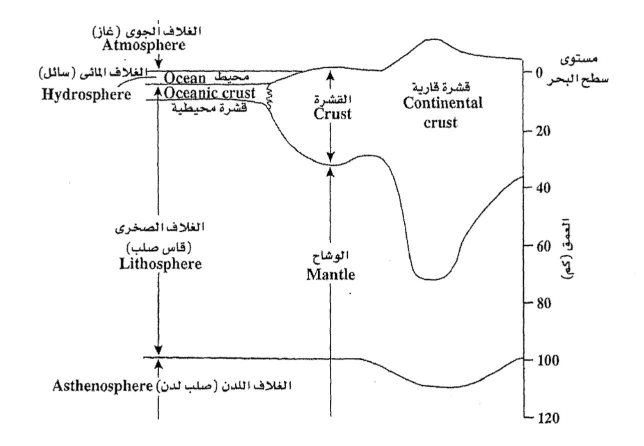
ويقـــع **الغـــلاف الأوســـط (الميزوســـفير) mesosphere** فى الجزء الداخلى من الوشاح المجاور للب الأرض بين عمـق 2891 كـم ونحـو 350 كـم ، ويشتق اسمه من الكلمة اليونانية meso بمعنى أوسط وsphere بمعنـى غـلاف . والغـلاف الأوسـط هـو منطقـة صـلبة ، حيـث تكـون الـصخور فيـه معرضـة لضغوط عالية ، وتتميز بـشدة أى بـصلابة عاليـة على الرغم من درجة حرارتها العالية جداً.

الغلاف اللدن (الأسثينوسـفير): ويوجـد فى الجـزء العلوى من الوشاح (شـكل 4.1) ، ويمتـد مـن عمـق 350 كـم إلى مـا بـين 100 أو 200 كـم أسـفل سـطح الأرض ، ويشتق اسم **الغلاف اللـدن (الأسثينوسـفير) asthenosphere**من الكلمة اليونانيـة asthenos بمعنى ضعيف وsphere بمعنى غلاف . ويتميز بـأن شدة الصخور تكون فيه قليلة نتيجة التوازن بين درجـة الحرارة والضغط ، كما تكون الصخور ضـعيفة وسـهلة التشوه ، مثل الزبد أو القطـران الـدافئ بـدل أن تكـون قوية مثل تلك الموجودة فى الغلاف الأوسط . ويلاحظ أن تركيب الغلافـين الأوسـط واللـدن واحـد ، حيـث يتكونان مـن المـواد نفـسها ، بينـما يختلفـان فى الـشدة . فتكون الصخور فى الغلاف اللدن لدنة ، بينما تكـون فى الغلاف الأوسط صلبة .

الغـلاف الـصخرى (الليثوسـفير): ويوجـد فـوق الغلاف اللدن ، ويشمل كل المنطقـة الخارجيـة الـصلبة للأرض والتى تتكون من الجزء العلوى للوشـاح وكـل القشرة الأرضية (شـكل 4.1). ويـشتق اسـم **الغـلاف الصخرى (الليثوسـفير) lithosphere** مـن الكلمـة اليونانيـة lithos بمعنـى حجـر أو صـخر وsphere

بمعنى غلاف . وتكون الصخور فيه صلبة ، كما تكـون أكثر برودة وقوة وصلابة من تلك الموجودة فى الغـلاف اللدن . وعلى الرغم من الاختلاف فى التركيب بين كـل مـن القـشرة والوشـاح ، إلا أن شـدة الـصخر ولـيس تركيبه هى التى تميـز الغـلاف الـصخرى عـن الغـلاف اللدن .

ويوضـح هذا الاختلاف فى طبيعـة أغلفـة الأرض ، أن الغلاف الصخرى يعمل كغلاف صلب قابل للكسر بينما ينساب الغلاف اللدن الموجود أسفله كـمادة لدنـة . فالاختلاف فى الشدة بين صخر فى الغـلاف الـصخرى وصـخر آخـر فى الغـلاف اللـدن هـو عـاملا الـضغط ودرجة الحرارة المؤثران على كل منهما . وتفقد كل أنواع الـصخور شـدتها وتـصبح قابلـة للتـشوه عنـد عمـق



شكل (**4.1**): تمايز الطبقات العليا من الأرض:

(أ) بناء على تركيبها ، حيث تفصل القشرة منخفضة الكثافة عن الوشاح العلوى الذى يسفله مباشرة ويكون أعلى كثافة، أو

(ب) بناء على شدتها ، حيث يتراكب الغلاف الصخرى الصلد فوق طبقة الأستينوسفير اللدنة .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

100كم عند قاعدة الغلاف الصخرى تحت المحيطات ، أو عنـد عمـق نحـو 200 كـم عنـد قاعـدة الغـلاف الصخرى تحت القارات .

د – نشأة القارات والمحيطات والغلاف الجوى

بـصرف النظـر عـن الحـرارة التـى نـشأت عـن الاصطدامات التى حدثت أثناء المرحلـة الأولى لتكـوّن الأرض ، فقد كان هناك مصدران دائمان للحـرارة عـبر تاريخ الأرض ، أحدهما داخلى نتج معظمه من النـشاط الإشعاعى والآخر خارجى نتج عن الطاقة الشمـسية . وكما أن آلة الاحتراق الموجودة فى الـسيارة مـثلا تحـول الطاقة الحرارية الناتجة عـن احـتراق الوقـود إلى حركـة ميكانيكيـة ، فـإن الحـرارة الداخليـة تـسبب انـصهار الصخور والنشاط البركانى ، كما تعطى الطاقة اللازمـة لبناء وحركة القارات وحركة الجبال على امتداد صدوع الدسر thrust faults لأعـلى . أمـا الحـرارة الخارجيـة فإنها تكون مسئولة عن المناخ وحالة الطقس ، والتجوية وسقوط الأمطار وحركة الرياح التى تعمل عـلى تعريـة الجبال وتشكيل صفحة الأرض.

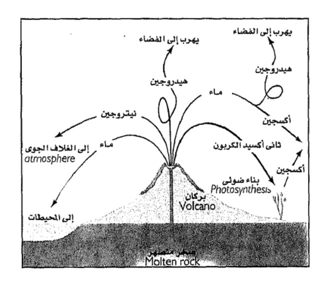
القارات : بدأ نمو القارات بعد مرحلة تمـايز أغلفـة الأرض مباشرة ، واستمر ذلـك النمـو خـلال الـزمن الجيولوجى . وعموما ، فإن معلوماتنـا عـن الـسبب فى تكوّن القارات مازالـت فى بـدايتها. ويعتقـد كثـير مـن العلـماء أن الـصهارة تـصاعدت مـن بـاطن الأرض المنصهر إلى السطح لتبرد وتتصلب وتكـوّن قـشرة مـن الـصخور. وقـد انـصهرت تلـك القـشرة الابتدائيـة وتصلبت مرارا وتكرارا لتسمح للمواد الخفيفـة الأقـل كثافة لتنفصل تدريجيا عـن المـواد الثقيلـة وتطفـو نحـو السطح لتكون النواة الأولى للقارات . وقد تسببت مياه الأمطـار وبقيـة مكونـات الغـلاف الجـوى فى تحلـل وتفكك الصخور ، حيث عملت المياه والرياح والجليـد عـلى تفكـك الـصخور ونقـل الحطـام الـصخرى إلى الأماكن المنخفـضة ليتجمـع فى هيئـة طبقـات سـميكة تكوّن الشواطئ والدلتات وقيعـان البحـار المجـاورة . وقد أدى تكرار هذه العمليـة فى عـدد غـير محـدود مـن الدورات إلى تكوّن القارات .

المحيطـات والغـلاف الجـوى: يعتقـد معظـم الجيولوجيين أن أصل مياه المحيطات والغلاف الجـوى يرجـع إلى الأرض نفـسها ، حيـث تكوّنـت الميـاه والغازات أثناء عمليات التسخين والتمايز ، بينما يعتقـد قلة أخرى من الجيولـوجيين أن أصـل ميـاه المحيطـات والغـلاف الجـوى يرجـع لـسبب خـارجى ، أى إلى المذنبات comets . فعندما قُـذفت الأرض فى المرحلـة المبكرة لتكونها بعـدد لا يحـصى مـن المـذنبات المحملـة بالمياه والغازات ، تكونت المحيطات الأوليـة والغـلاف الجوى .

ويعتقـد الجيولوجيـون الـذين يُرجعـون أصـل المحيطات والغلاف الجوى إلى الأرض نفـسها أن المـاء موجود أصلاً فى بعض المعادن كأكسيجين وهيدروجين مرتبطان كيميائيا فى تلك المعادن ، كما يوجد النيتروجين أيضا مرتبطا كيميائيا فى معادن أخرى . وأثنـاء تـسخين الأرض وانـصهار مكوناتهـا جزئيـا انطلـق بخـار المـاء

والغازات الأخـرى لتحملهـا الـصهارات إلى الـسطح وتنطلق أثناء النشاط البركانى . فـربما كانـت الغـازات المنبعثة من البراكين منذ نحو 4 بليون سـنة مكوّنـة مـن المواد نفسها التى تقذفها البراكين اليوم مثل بخـار المـاء والهيـدروجين وثـانى أكـسيد الكربـون والنيتروجـين والقليل من الغازات الأخرى (شـكل 5.1) . وهكـذا، فإن الغلاف الجوى الأوّلى للأرض كان مختلفا تماما عـن الغـلاف الجـوى الحـالى ، والـذى يتكـون أساسا مـن النيتروجين والأكسيجين . وربما تكونت كميات مناسبة من الأكسيجين الحر بعـد بـدء الحيـاة نتيجـة لعمليـات البنـاء الـضوئى photosynthesis التـى قامـت بهـا الطحالب ، والتـى تعتـبر أحـد أبـسط أشـكال الحيـاة وحيـدة الخليـة . وتـستخدم الطحالـب ثـانى أكـسيد الكربـون والمـاء وطاقـة أشـعة الـشمس لتكـوّن المـادة العضوية وينطلق الأكسيجين الـذى بـدأ فى الـتراكم فى الغلاف الجوى ليصل تدريجيا إلى نسبته الحالية .

أحواض المحيطـات: مـن الملامـح المهمـة لكوكـب الأرض وجـود القـارات وأحـواض المحيطـات عـلى سـطحه . وتغطـى المحيطـات نحـو 71٪ مـن سـطح الأرض ، ويبلغ متوسط العمق فيها نحو 3.7 كم ، بينما تغطى اليابسة نحو 29٪ المتبقيـة مـن سـطح الأرض . ويقسم قاع المحيط ابتداء من خط الشاطئ حتى أعمـق نقطة فى الحـوض المحيطـى إلى أربعـة أقسام ، وهـى : الـرف القـارى والمنحـدر القـارى والمرتفـع القـارى والسهل الـسحيقى (شـكل 6.1). أما **الـرف القـارى continental shelf** فهـو الحافـة لطيفـة الانحـدار

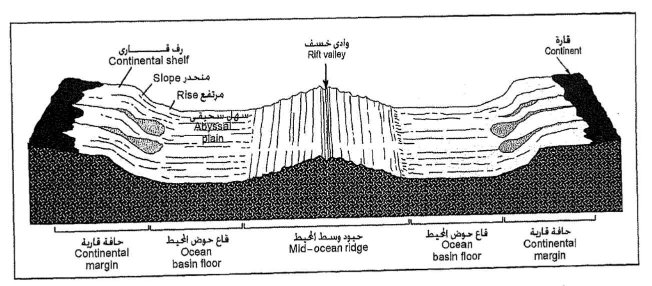


شكل (**5.1**): يضيف النشاط البركانى كميات هائلة من الماء وثانى أكسيد الكربون وغيرها من الغازات إلى الغلاف الجوى للأرض ، كما يضيف أيضا كميات من المواد الصلبة للقارات . كما عملت عملية البناء الضوئى التى تقوم بها النباتات على إزالة ثانى أكسيد الكربون وإضافة الأكسيجين إلى الغلاف الجوى الابتدائى للأرض ، بينما هرب الهيدروجين من جو الأرض بسهولة نظرا لخفة وزنه .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

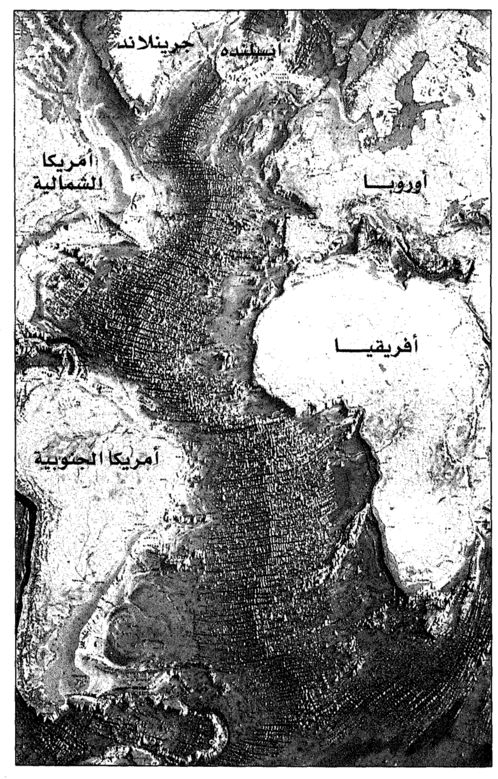
التى تحيط بالقارات وتمتـد مـن خـط الـشاطئ فى اتجـاه البحر ، وتكون مغمـورة بـماء المحـيط الـضحل نـسبيا. ويختلف عرض الرف القـارى بدرجـة كبيرة . فهو قـد لا يتواجد مطلقا حول بعض القارات ، بيـنما قـد يمتـد لمـسافة قـد تـصل إلى 1500 كيلـومتر حـول قـارات أخرى. ويكون عرض الرف القارى فى المتوسـط نحـو 80 كيلومترا ، وقد يصل إلى 130 مترا عمقـا . ويكـون انحدار الرف القارى لطيفا لدرجة أنه يبدو للناظر كأنه سـطح أفقـى . ويـلى الـرف القـارى المنحـدر القـارى

continental slope ويبلغ عرضه نحو 25 كم ، ويتميز بانحدار حاد مقارنة بالرف القارى. أما الارتفاع القارى **continental rise** والذى يمتد من المنحدر القارى فى اتجاه البحر حتى السهل السحيقى . ويمتد الارتفاع القارى لمئات الكيلومترات حتى حوض المحيط العميق . ويكون الارتفاع القارى جزءا مميزا من قاع المحيط ، ويتكون من قشرة محيطية مغطاة بالرواسب الناتجة عن تعرية كتلة القارة المجاورة. ويشمل السهل السحيقى **abyssal plain** المساحة الكبيرة المنبسطة من قاع المحيط ، والتى تمتد فى العرض من 200 حتى 2000 كم، ويتراوح عمقها بين 3 إلى 6 كم تحت سطح المحيط . ويتكون السهل السحيقى من تراكم الرواسب التى تحركت أسفل المنحدرات من الرف القارى إلى قاع المحيط العميق. ويرتفع أحيانا من تلك السهول براكين خامدة غالبا تعرف بالجبال البحرية seamounts . وقد يرتفع القليل من هذه الجبال لتكوّن جزرا بركانية . وعلى الرغم من أن المرتفعات القارية لا تتواجد بها تقريبا أى ملامح مميزة ، إلا أن أسطحها تكون مقطوعة أحيانا بأخاديد خانقة بحرية submarine canyons أو براكين بحرية لم تُدفن تماما تحت الرواسب .

ولا تنطبق خطوط الشواطئ الحالية بالضبط مع الحدود الفاصلة بين القشرة القارية والمحيطية ، نظرا لأن ماء المحيط يتدفق ليغطى جزءا من القارة . كما أن الحافة الجيولوجية لحوض المحيط ليست هى خط الشاطئ ، بل هى المكان الذى يفصل بين القشرة المحيطية والقشرة القارية ، وتوجد هذه الحافة أسفل المنحدر القارى .



شكل (**6.1**): أقسام قاع المحيط الرئيسية ، حيث يظهر جزء من قاع المحيط الأطلنطى .
(After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



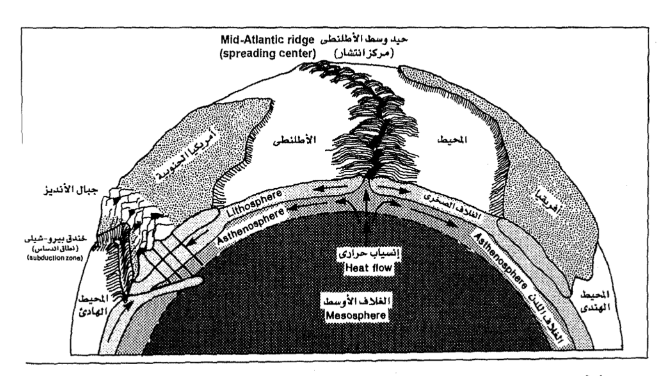
شكل (**7.1**): خريطة طوبوغرافية لقاع المحيط الأطلنطى (بعد إزالة الماء)، توضح حيود وسط الأطلنطى **Mid-Atlantic Ridge**، لاحظ أن جزيرة أيسلندا تقع على حيد وسط المحيط الأطلنطى، حيث تظهر واحدة من أكبر سلاسل الجبال فى العالم. كما توضح الخريطة الفرق فى المعالم الطوبوغرافية لقاع المحيط وتلك الموجودة فوق القارات.

(After Heezen, C. and Tharp, M., 1977: World ocean floor panorama in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ومن المعالم المميزة لقيعان المحيطات الحيود المحيطية والخنادق المحيطية . أما الحيـود المحيطيـة **oceanic ridges** والتى تعرف أيضاً بالحيود وسط المحيطية **mid-ocean-ridges** أو المرتفعـات المحيطيـة **oceanic rises**، فهى سلاسل جبلية صخرية تكون مستمرة على قيعان المحيطات ، حيث يبلغ ارتفاعها حوالى 0.6 كم أو أكثر فوق قاع المحيط (شكل 7.1) . وتتفرع الحيود المحيطية فى نمط معقد فى الأحواض المحيطية .

وتتواجد الحيود المحيطية فى كل المحيطات الرئيسية فى العالم حيث تمثل أكثر من 20 ٪ من سطح الأرض .

وتمثل تلك الحيود المحيطية أكثر الملامح المحيطية الطوبوغرافية أهمية فى المحيطات ، حيث تكوّن سلاسل متصلة من الجبال تمتد إلى حوالى 65000 كيلو متر. وعلى الرغم من أن الحيود المحيطية ترتفع عاليا فوق قيعان المحيطات ، إلا أنها تختلف كثيرا عن الجبال الموجودة فوق القارات ، التى تتكون من تتابعات من الصخور الرسوبية المطوية والمتصدعة ، بينما تتكون الحيود المحيطية من طبقات متتابعة من الصخور البازلتية التى رفعت وتصدعت . ويبدو أن مصطلح حيود ridges غير دقيق ، حيث إن تلك الحيود ليست ضيقة ، بل قد يتراوح عرضها بين 500 و 5000 كيلو



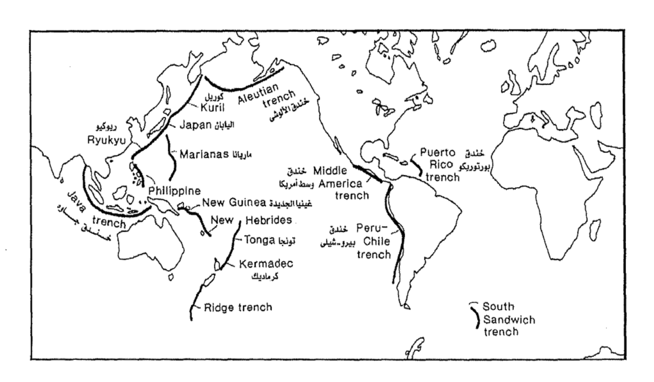
شكل (**8.1**): شكل توضيحى لعمليات بنائية الألواح فى الوقت الحاضر ، حيث يفتح المحيط الأطلنطى بسبب عمليات انتشار نشطة فى سلاسل الجبال البركانية الواقعة وسطه على امتداد حيد وسط الأطلنطى ، والذى يتميز مثل باقى حيود وسط المحيط mid-ocean ridges بوجود وادى خسف rift valley فى منتصفه وانسياب حرارى عال . وتتحرك أمريكا الجنوبية غربا ، حيث يندس (يهبط) تحتها لوح نازكا ، وتؤدى عملية الاندساس إلى تكون خندق محيطى عميق (خندق بيرو - شيلى) وجبال الأنديز. لاحظ الصدوع التى تفتح حيد وسط الأطلنطى .

(After Wyllie, P. J., 1976: The way the earth works. John Wiley & Sons, Inc., New York).

متر، وفى بعض الأماكن قد تشغل تلك الحيود نصف المساحة الكلية لقاع المحيط.

وتكون الحيود وسط المحيطية مكسرة من منتصفها حيث يوجد واد ضيق يتميز بنشاط زلزالى وبركانى، بالإضافة إلى انبعاث حرارى عال (شكل 8.1) . يعرف هذا الوادى بوادى خسف**rift valley** . وتتزايد أعمار الصخور البركانية فى الحيود وسط المحيطية كلما ابتعدنا عن النطاق الأخدودى فى اتجاه الشاطىء. وتتميز وديان الخسف بأن الصخور البركانية فيها تكون حديثة، كما تكون خالية تقريباً من الرواسب . ونادرا ما يرتفع حيد وسط المحيط إلى مستوى سطح البحر ليكوّن جزراً بركانية، وأكبر تلك الجزر جزيرة أيسلنده التى تقع على حيد وسط المحيط الأطلنطى .

أما الخنادق **trenches** المحيطية فهى الأماكن على قيعان المحيطات التى يغوص عندها الغلاف الصخرى فى الوشاح، وتكون عبارة عن أحواض طويلة وضيقة وعميقة فى قاع المحيط، جوانبها شديدة الانحدار، وتمثل أعمق أجزاء المحيط. وتكون الخنادق المحيطية عادة موازية لحافة قارية أو للجزر البركانية التى تتخذ شكل أقواس (شكل 9.1). وتوجد معظم الخنادق فى



شكل (**9.1**): خريطة توضح خنادق المحيط العميق، حيث تزيد أعماق المياه هنا ثلاثة أضعاف متوسط العمق فى المحيط، كما تتميز الخنادق بأنها مستطيلة وضيقة وتتواجد فى أماكن محددة . ويلاحظ أن الخنادق المحيطية تمتد موازية لحافة قارية أو للجزر البركانية التى تتخذ شكل أقواس .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

المحيط الهادئ ، حيث يصل عمق بعضها أو أجزاء منها إلى حوالى 10000 متر .

III - ديناميكيـة عمـل كوكـب الأرض: الأرض دائبـة الحركة

من المعروف أن الأرض مرت عبر تاريخها الطويـل بكثير من التغيرات . وهنا يبرز سؤال مهم وهو : ما هى القوى المحركة لتلك الأحداث ؟ . وتكمن الإجابـة فى نظريــة تكتونيــة الألـــواح **theory of plate tectonics** . وتفـترض هـذه النظريـة أن الغـلاف الصخرى الصلب الخارجى للأرض مقسم إلى عدد من القطع الـصلبة ، التـى تتحـرك جانبيـا بـبطء وتعـرف بالألواح **plates** . ونتيجة لحركة تلـك الألـواح فإنهـا تتفاعل مع بعضها بعضا عنـد حوافهـا باسـتمرار ، ممـا ينشأ عنه نشاط زلزالى وبنائى على امتداد تلك الألواح . وتقـدم هـذه النظريـة شرحـا لكيفيـة تكـوّن الألـواح وميكانيكية حركتهـا وتـداخلها واسـتهلاكها لبعـضها الـبعض ، كـما تفـسر كيـف تكونـت القـارات وأيـضا النشاط الزلزالى والبركـانى والحركـات البانيـة للجبـال وغيرهـا مـن الظـواهر الجيولوجيـة التـى تحـدث عـلى الأرض .

ومـن المهـم قبـل أن نتنـاول شرح نظريـة تكتونيـة الألواح أن نعـرض لـبعض النظريـات العلميـة ، التـى سـبقت تلـك النظريـة وحاولـت شرح طريقـة عمـل الأرض .

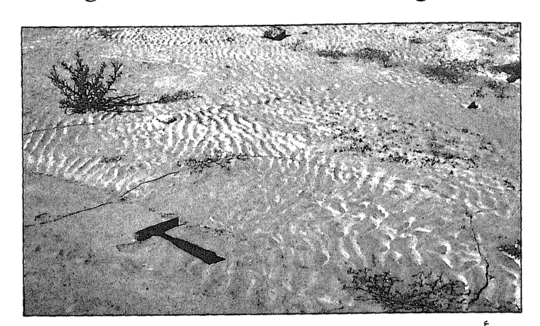
أ - نظرية الكوارث ومبدأ الوتيرة الواحدة

كان من المعتقد خلال القرنين السابع عشر والثـامن عشر ، وقبل أن يصبح علم الجيولوجيا علما قائما بذاته ، أن كـل معـالم الكـرة الأرضـية مـن الجبـال والوديـان والمحيطات قد نشأت نتيجة عدد قليـل مـن الكـوارث الفجائية الكبيرة . وكان يُعتقد أن هذه الكوارث كانـت من الضخامة بحيث لا يمكن شرحها بالمفاهيم العادية. كما اصطلح على تسمية النظرية التى تشمل هذه الفكـرة نظريـــة الكـــوارث **catastrophism** أو الكوارثيـــة والتـى وضـــعها العـــالم الفرنـسى جـــورج كوفييـــه Georges Cuvier (1769-1832م).

وفى أواخــر القــرن التاســع عــشر جمــع الطبيــب الإسـكتلندى جـيمس هــاتون James Hutton (1756-1797م) العديد من المـشاهدات التـى مكنتـه من التوصل إلى نظرية جديدة ، تضاد نظرية الكوارث ، وتشرح كيف تعمـل الأرض ، وعرفـت هـذه النظريـة بقـانون أو مبـدأ الـوتيرة الواحـدة **principle of uniformitarianism** ، وينص على أن كـل مظـاهر الأرض الطبيعية والحيوية ، سواء منها ما هو فى الحاضر أو ما كان فى الماضى ، قد أنتجتها العمليات الجيولوجيـة نفسها التى تعمل اليوم . كـما يمكـن تفـسير الأحـداث الجيولوجية التى وقعت فى المـاضى مـن خـلال دراسـة الظواهر والعمليـات التـى تـدور عـلى سـطح الأرض اليوم . فمثلا عندما نرى علامات نـيم ripple marks على سطح حجر رملى قديم ، فإننا نفترض أنها تكونـت

بالطريقة نفسها التى تتكون بها علامات النيم اليوم تحت تأثير حركة المياه أو الرياح (شكل 10.1).

ويمكن تلخيص مبدأ الوتيرة الواحدة فى جملة مختصرة تقول: "إن الحاضر مفتاح الماضى". إلا أن العالم



أ

ب

شكل (10.1): توضيح مبدأ الوتيرة الواحدة Principle of uniformitarianism

(أ)علامات نيم حديثة فى كثبان رملية متحركة حيث تصطف مويجات من الرمل فى نمط منتظم ، وتكون قممها عمودية على اتجاه الريح. طريق قفط – القصير ، الصحراء الشرقية – مصر (أ. د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية).

(ب)علامات نيم قديمة فى صخور حجر رملى من تكوين الطارف التابعة للعصر الطباشيرى – وسط الصحراء الشرقية – مصر . (د. محمد ضياء الدين كامل – قسم الجيولوجيا – جامعة الأزهر) .

الإنجـــــليزى تـشــــارلز ليــــل Charles Lyell (1797-1875م) كـان لـه دور أساسـى فى دعـم هـذه النظرية ، حيث لم يُثبت فقط أن العمليات الجيولوجيـة التى كانت فى الماضى هى العمليات نفسها التـى تعمـل على الأرض حاليا ، وإنما أثبت أيضا أنهـا تعمـل بـنفس المعدل بل وبالنظام نفسه .

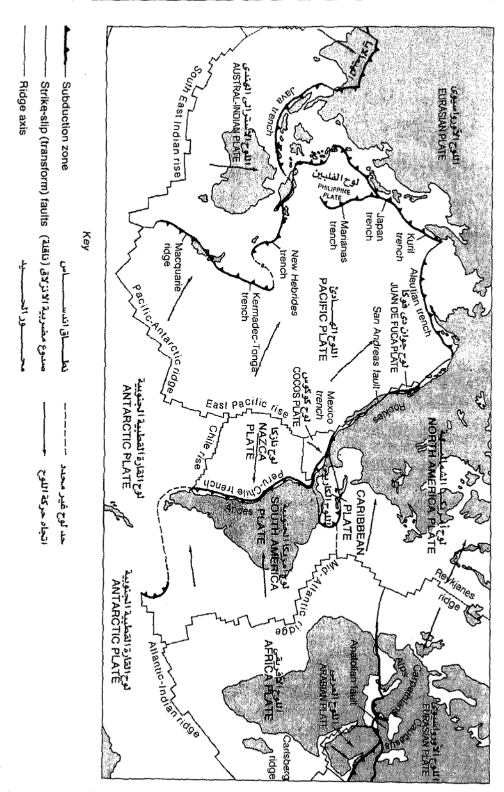
هذا وقد لاقى الجزء الأول من النظرية الذى يـنص على وجود العمليات نفسها فى الماضى والحـاضر قبـولا عاما من معاصرى ليل ، بينما لم يلق الجزء الثانى الخاص بثبات المعـدل القبـول نفسه لـديهم . وأدخـل هـؤلاء ومـنهم كونـستنت بريفوسـت Constant Prevost مبـدأ الواقعيـة **actualism** ، الـذى يـنص عـلى أن العمليات الجيولوجية فى الحاضر هى نفـس العمليـات التى كانت تعمل طوال الزمن الجيولوجى ، ولكن كـان معدل عملهـا يتغـير مـن زمـن لآخـر، بـسبب وجـود تأثيرات إضـافية أو توافـق تـأثير بعـض العوامـل مـع بعضها فى الزمن نفسه.

وبحلول عام 1850 م ، كان مبدأ الـوتيرة الواحـدة فى الجانب الفيزيائى قد لاقى قبولا فى أوساط العلـماء ، إلا أنه لم يلق القبول نفسه فى الجانب البيولـوجى حتـى من جانب تشارلز ليل نفسه . واسـتمر الحـال كـذلك حـتى أتـى تـشــارلز داروين Charles Darwin (1809-1882م) ليقدم نظريـة التطـور **Theory of evolution** ، والتى هى تطبيق لفكرة الوتيرة الواحدة ولكن فى الجانب البيولوجى ، حيـث تـؤدى التغـيرات البسيطة فى الكائنات الحية عبر فترات زمنيـة طويلـة إلى تغيرات فى المجموعـات الحيـة تـؤدى إلى ظهـور أنـواع جديدة باسـتمرار . وبـذلك أدى داروين لعلـوم الحيـاة الدور نفسه الذى لعبه هاتون وليل لعلم الجيولوجيا.

وقـد ثبـت مـن تطبيـق مبـدأ الـوتيرة الواحـدة أن الأرض قديمـة للغايـة ، لأن العمليـات الجيولوجيـة تستغرق وقتا طويلا لحدوثها ، فمثلا تجوية جبل شاهق أو نقل كميات ضخمة من الرمال بواسطة مجرى مـائى تتطلب فترة زمنية تقدر بملايين السنين . كـما أن تطـور الحياة على الأرض يتطلب زمنـا طـويلا أيـضا . إلا أنـه لوحظ أن تاريخ الأرض شهد عددا من الكوارث مثـل الانقراض الجماعـى لمجموعـة الديناصـورات فى نهايـة العصر الطباشيرى قبل 65 مليون سنة ، مما يـشير إلى أن نظرية الكوارث قد يكون من الممكن تطبيقها فى بعـض الأحيان أيضا.

ب – تكتونية الألواح: نظرية شاملة لعلم الجيولوجيا

اجتاحـت علـم الجيولوجيـا ثـورة فكريـة كبـيرة فى ستينيات القرن الماضى ، نتيجة لظهـور نظريـة تكتونيـة الألواح ، مـثلما حـدث فى علـم الفيزيـاء عنـد بـدايات القرن العشرين عنـدما ظهـرت نظريـة النـسبية ، وكـما حدث فى علوم البيولوجيا فى منتصف القـرن العـشرين عندما اكتشف الحامض النووى DNA ، والـذى مكـن العلـماء مــن شرح قــوانين الوراثــة . وقــد حــاول الجيولوجيـون عـلى امتـداد 200 سـنة سـابقة وضـع نظريات عديـدة لـشرح كيـف نـشأت الجبـال وتفـسير النشـــاط البركانى وغـيرها مـن الظـواهر الجيولوجيـة



شكل (**11.1**): ألواح القشرة الأرضية التى تغطى سطح الكرة الأرضية فى الوقت الحاضر . حيث تتحرك الألواح الصلبة ببطء أفقيا فى اتجاه بعضها البعض ، أو تتحرك متباعدة عن بعضها البعض . وتفترض الأسهم الموضحة على الألواح أن اللوح الإفريقى لا يتحرك . وتنفصل الألواح على امتداد حيود وسط المحيط **mid-oceanic ridges**، كما قد تنزلق أفقيا أمام بعضها البعض على امتداد الصدوع الناقلة **transform faults** وتتقارب على امتداد نطاقات الاندساس **subduction zones** .

(After Dewey, J.F., 1972: Plate tectonics. Sci. Am., Inc.).

الأخرى ، إلا أنه لم يتم التوصل إلى نظرية واحدة تشرح كل الظواهر والعمليات الجيولوجية . بينما نستطيع أن ندعى الآن أن لدينا نظرية واحدة تشرح الكثير من المظاهر الجيولوجية الكبيرة فى الأرض . وبالإضافة إلى ذلك فهناك بعض ظواهر ومجالات أخرى : مثل تصنيف وتوزيع الصخور ومواقع البراكين والخصائص المميزة لها وأحزمة الزلازل وأنظمة الجبال وأحواض المحيطات ، كانت تعامل سابقا كموضوعات منفصلة عن بعضها البعض . أما اليوم فإن الجيولوجيين يتعاملون مع كل تلك الموضوعات وغيرها فى سياق نظرية واحدة شاملة هى **نظرية تكتونية الألواح** plate tectonic theory.

وتفترض نظرية تكتونية الألواح أن الكرة الأرضية مغلفة تماما بالغلاف الصخرى الصلب ، والذى ينقسم إلى سبعة ألواح كبيرة وعدد من الألواح الصغيرة (شكل 11.1) . ويختلف سمك الألواح بين 100 إلى 200 كم فى الألواح المكونة من الوشاح العلوى والقشرة القارية ، بينما فى الألواح المكونة من الوشاح العلوى والقشرة المحيطية يتراوح السمك بين 10 كم عند الحيود المحيطية و 100 كم فى أحواض المحيطات العميقة . وتتحرك كل الألواح جانبيا كوحدات متماسكة مستقلة فوق الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، والذى يكون فى حالة حركة أيضا . بمعنى أن الألواح لا تتجعد أو تطوى ، مثل قطعة الورق المبللة وإنما تسلك سلوك ألواح الخشب الصلبة نسبيا فوق سطح الماء . وتتراوح سرعة الألواح من 1 إلى 12 سم فى العام. ويمكن أن تتثنى الألواح قليلاً ، مما يسبب حدوث التواءات لطيفة لأعلى أو لأسفل فى القشرة الأرضية. وتعتبر حدود الألواح هى الأماكن الوحيدة التى يحدث فيها تشوه شديد ، حين تصطدم الألواح ببعضها بعضا .

وتختلف مساحة الألواح كثيرا ، حيث إن أكبرها مساحة هو لوح المحيط الهادى الذى يقع بكامله تقريبا تحت مياه المحيط . أما بقية الألواح الكبيرة فإنها تتكون من جزء من قشرة قارية وجزء من قشرة محيطية . وعلى الجانب الآخر ، فإن هناك عددا من الألواح الصغيرة التى تتكون كلية من قشرة محيطية مثل لوح الفلبين ولوح نازكا غرب شاطئ أمريكا الجنوبية، أو من قشرة قارية كلية مثل اللوح العربى .

حركات الألواح

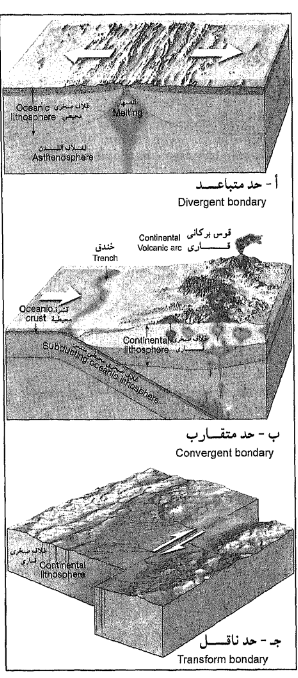
يرجع السبب فى حركة الألواح إلى أن باطن الأرض مازال ساخنا ، كما أن الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ساخن أيضا وقابل للتشكل ، على الرغم من أنه فى حالة صلبة تقريبا . ويتميز الغلاف اللدن بقدرته على الانسياب تحت تأثير القوى التى تسببها تيارات الحمل الدورانى convection currents . وتيارات الحمل الدورانى هى الميكانيكية التى تنتقل بها الحرارة التى تسبب صعود المواد الساخنة الأقل كثافة وهبوط المواد الباردة الأكثر كثافة. والحمل الدورانى هو خاصية مميزة للسوائل والغازات ، حيث تشاهد تيارات الحمل الدورانى فى الماء المغلى فى كأس به ماء ، وكذلك

الدخان المتصاعد من المدفئة ، وصعود الهـواء الساخن إلى أعلى نحو سقف الغرفة وهبوط الهواء البارد إلى أرضية الغرفة. وتحدث حركة الحمل الدوراني في أي مادة منسابة سائلة كانت أم صلبة قابلة للتشكل حينما تُسخّن من أسفل وتُبرّد من أعلى . وقد أظهرت التجارب أن الصخور لا تبدأ في الانصهار قبل أن تنساب، وقد تنساب الصخور ، إذا كانت ساخنة بدرجة كافية ، مثل السوائل اللزجة . مع ملاحظة أن معدلات الانسياب تكون بطيئة للغاية ، وكلما ارتفعت درجة الحرارة كان الصخر أكثر ضعفا ، وأكثر قابلية للانسياب . وتصعد السوائل والمواد الصلبة الساخنة تحت تأثير قوى الطفو ؛ لأنها أصبحت أقل صلابة من المادة التي تعلوها . وتفقد المادة الحرارة وتبرد أثناء حركتها على السطح وتصبح أكثر كثافة ، وبالتالي أثقل من المادة الموجودة أسفلها وتهبط تحت تأثير الجاذبية. وتستمر عملية الدوران طالما كان هناك انتقال للحرارة من أسفل إلى أعلى حيث السطح البارد.

2 – حدود الألواح

يتواجد الكثير من المعالم الجيولوجية الكبيرة عند حدود الألواح ، حيث تتفاعل الألواح مع بعضها البعض . ويوضح شكل (12.1) الأنواع الثلاثة من الحدود المعروفة ، وهي كالتالي :

1. حدود متباعدة : حيث تنفصل الألواح وتتحرك متباعدة عن بعضها البعض، مما يؤدي إلى نشأة غلاف صخري جديد من الصهارة الصاعدة .



شكل (**12.1**): الأنواع المختلفة للحدود بين الألواح ، وتوضح الأسهم الحركة النسبية للألواح

(أ) حدود متباعدة **divergent boundaries**

(ب) حدود متقاربة **convergent boundaries**

(جـ) حدود صدع ناقل **transform fault boundaries** .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

2. حـدود متقاربـة: حيـث تتـصادم الألـواح أو يهـبط أحدها تحت الآخـر ويعـود الغـلاف الـصخرى إلى باطن الأرض.

3. حدود الصدع الناقل: حيث تنزلق الألواح أفقيا أمام بعـضها الـبعض فـتطحن وتـبرى حوافهـا نتيجـة الانزلاق. وتكون الزلازل شائعة على امتداد حواف الصدوع الناقلة.

ونعرض فيما يلى وصفا مفصلا لكل من هذه الأنواع الثلاثة من الحدود :

الحدود المتباعدة

تـــسمى الحــــدود المتباعـــدة **divergent boundaries** أحيانـا مراكـز انتـشار spreading centers ، حيث تتباعد الألواح المتجاورة بمعدل عدة سنتيمترات كل عام . وتعتبر الحـدود المتباعـدة أمـاكن لتكوين القشرة الأرضية ، حيث تنبثق عند هذه الحـدود المادة الصخرية الساخنة مـن الوشـاح وتـبرد وتتـصلد وتكوّن قشرة محيطية جديدة ، لذلك يطلق عليهـا أيـضا الحـدود البنـاءة constructive boundaries. كـما تتكون عندها سلاسل جبلية مـن البازلـت مغمـورة فى قيعان المحيطات ، والتى تعرف بحيـود وسـط المحـيط mid-ocean ridges مثـل حيـد وسـط الأطلنطـى mid-Atlantic ridge. كما قد تتكون الحدود المتباعدة هذه بين لوحين قاريين مثل البحر الأحمـر ، الـذى يقـع بين اللوح الإفريقى واللوح العربى.

ولنفهم كيـف يتحـرك اللـوح ، فعلينـا أن ننظـر إلى الحزام الناقل للحقائب أو البضائع ، حينـما يـصعد مـن أسفل ويتحـرك عـلى امتـداد طـول معـين ثـم يتحـرك لأسفل ليختفى . ويشبه لوح الغلاف الـصخرى الجـزء العلوى من حزام ناقل يتحرك ببطء رغـم كـون اللـوح الصخرى عريضا وغير منتظم . ويتحرك كل لوح بعيدا عن مركز الانتشار ، كما لو أن هناك حزاما مستمرا عـلى امتداد كسر فى الوشـاح يـصعد لأعـلى. وهـذا التـشبيه صحيح جزئيا ، لأن اللوح لا يكون عبـارة عـن شريـط متماسك صلب ، وإنما يتكون من قشرة جديـدة تـضاف على امتداد الكسر . وهناك فرق آخر ، وهو أن اللـوحين يتحركان فى اتجاهين متضادين ، كما لو أن هناك حزامين ناقلين يتحركان فى اتجاهين متضادين .

وعندما يحدث تباعد فى قشرة محيطية ، يتكون حيـود وسط المحيط ، حيث تؤدى تيارات الحمـل إلى صـعود الصخر الساخن من الوشاح ، كما يتحرك الحد الفاصل بـــين الغلافـــين الـــصخرى (الليثوســـفير) واللــــدن (الأسثينوسفير) قريبا جدا مـن قـاع المحـيط ، وتـصبح بعض أجزاء الغلاف اللدن سـاخنة لدرجـة تكفـى لأن يبدأ الانصهار. ويطلق على الـصخر المنـصهر مـصطلح صهارة **magma**. حيث تصعد الصهارة التى تتكـون فى الغلاف اللدن (الأسثينوسـفير) تحـت حيـود وسـط المحيط إلى قمة الغلاف الصخرى لتبرد وتتصلد لتكوّن قـشرة محيطيـة جديـدة (شـكل 12.1 أ) . وتـسمى الميكانيكية التى يتكون بها قاع المحيط الأطلنطى خـلال

160 مليون سـنة الماضـية ، بانتـشار **قيعـان المحيطـات seafloor spreading** . ويقـدر معـدل انتـشار قيعان المحيطات بنحو 5 سم كل عام . وهذا المعدل غير ثابت ويتغير مـن مكـان إلى آخـر. ويبـدو هـذا المعـدل بطيئا، إلا أنه يكـون سريعـا بدرجـة تكفـى لنـشأة كـل قيعان المحيطات الموجودة خـلال الفـترة الزمنيـة التـى تمثل نحو 5٪ من تاريخ الأرض.

وعندما يتـسبب حـد التباعـد (مركـز الانتـشار) فى انشطار قشرة قارية ، فإنه تحدث سلسلة مـن الأحـداث تبدأ بتكوّن خسيف rift ، وهو عبارة عـن وادى طويـل تحده كـسور وصـدوع، مثـل وادى الخـسف الإفريقـى African Rift Valley الـذى يمتـد فى أثيوبيـا وكينيـا وتنزانيـا والمـالاوى. ويبـدأ النـشاط البركـانى عنـدما يتحرك جـزء القـشرة القاريـة بعيـدا (شـكل 23.17). وتؤدى الحركـة المـستمرة إلى اتـساع الخـسيف وزيـادة عمقه ، مثل البحر الأحمر. وفى النهاية ، تتحـرك أجـزاء القشرة القارية بعيدًا عن بعضها لتتكـون قـشرة محيطيـة جديدة تفصل بين الحدين المتباعـدين ، ويتكـون محـيط جديد . فالمحيط الأطلنطى الحالى لم يكن له وجود قبـل نحو 250 مليون سنة ، بـل كانـت القـارات الموجـودة حاليا عـلى جانبيـه متـصلة مـع بعـضها بعـضا فى قـارة واحـدة عظمـى تـسمى **البانجيـا Pangaea** (مـن اللاتينية بمعنى كل اليابسة) . ومنـذ نحـو 200 مليـون سنة بدأت تلك القارة الضخمة فى الانشطار على امتداد مراكز الانتشار. ويـسمى تحـرك القـارات عـلى امتـداد الزمن الجيولوجى **بالانجراف القارى continental drift** . ولـيس معروفـا عـلى وجـه الدقـة سـبب هـذا الانجراف ، وربـما يرجـع إلى تيـارات حمـل دورانـى فى الغلاف اللـدن (الأسثينوسـفير) والغـلاف الـصخرى (الليثوسفير). وقد شـطرت مراكـز الانتـشار الغـلاف الـصخرى وتكـسرت القـارة القديمـة إلى عـدة أجـزاء تمثلها القارات الحالية . كما انجرفـت تلـك الأجـزاء أو القارات الحالية إلى أوضاعها الحاليـة . وسـتناقش أدلـة الانجراف القارى فى الفصل السابع عشر من الكتاب .

الحدود المتقاربة

فى الحـــــدود المتقاربـــــة **convergent boundaries** يتحـرك لوحـان فى اتجـاه بعـضهما متقاربين (شكل 12.1 ب) . وفى هذه الحالة يهبط أحـد اللوحين (اللوح المحيطى) تحت الآخر حتـى يـصل إلى الوشاح لينصهر فى الأعماق ، مما يـؤدى إلى تهـدم المـادة الصخرية للقشرة الأرضـية ، ولـذلك يطلـق عـلى هـذا النـوع مـن الحـدود أيـضا مـصطلح الحـدود الهدامـة destructive boundaries . وتعرف هـذه العمليـة **بالاندساس subduction** ، كما تسمى منطقة الحافـة عندئـذٍ **نطـاق اندسـاس subduction zone** . وتؤدى قوى الاندساس والتصادم الهائلـة إلى حـدوث زلازل قوية . وتوجد الحـدود المتقاربـة أو الهدامـة بـين لـوحين محيطيـين مثـل منطقـة غـور تونجـا فى جنـوب المحيط الهادى ، أو بين لوح قـارى ولـوح محيطـى مثـل لوح نازكا المحيطى الذى يندس تحـت الجانـب القـارى

من لوح أمريكا الجنوبية (شكل 8.1). كما قد توجد الحدود المتقاربة أيضا ، عندما تتصادم قارتان ليتكون ما **يعرف بنطاق الاصطدام collision zone** ، مثل منطقة جبال الهيمالايا التى ارتفعت بسبب تصادم كتلة الهند بكتلة أوراسيا فى حين الميوسين .

ويعتقد العلماء أنه حدثت تصادمات بين قارات الأرض عدة مرات خلال الزمن الجيولوجى . ومثال ذلك تكون قارة البانجيا أو ما يطلق عليها أم القارات ، والتى تكونت أثناء العصر البرمى من تجمع كل يابس الكرة الأرضية فى كتلة واحدة منذ نحو 225 مليون سنة من الآن .

نطاقات الاندساس: يكون الغلاف الصخرى رقيقا بالقرب من حد التباعد (مركز الانتشار) عندما يقترب الحد الفاصل بين الغلاف الصخرى (الليثوسفير) والغلاف اللدن (الأسثينوسفير) من سطح الأرض . وترجع رقة الغلاف الصخرى إلى أن الصهارة الصاعدة تسبب ارتفاع درجة حرارة الغلاف الصخرى ، بينما تبقى الطبقة العليا الرقيقة منه تحتفظ بخصائص الصخر الصلب وشدته (شدة الصخر هى أقصى إجهاد يتحمله جسم صلب دون أن يتمزق أو يتشوه تشوها لدنا).

وعندما يتحرك الغلاف الصخرى بعيدا عن حد التباعد (مركز الانتشار)، فإنه يبردُ ويصبح أكثر كثافة ، كما يصبح الحد الفاصل بين الغلاف الصخرى والغلاف اللدن أكثر عمقا. ونتيجة لذلك ، فإن الغلاف الصخرى يصبح أكثر سمكا ، ويتحرك الحد الفاصل بين الغلافين الصخرى واللدن إلى مسافات أعمق. وفى النهاية، يصبح سمك الغلاف الصخرى ثابتا ، على بعد نحو 1000 كم من حد التباعد (مركز الانتشار) ، كما يصبح باردا وأكثر كثافة من الغلاف اللدن الساخن والضعيف أسفله ثم يبدأ فى الغوص لأسفل . ويغوص الغلاف الصخرى القديم مع القشرة المحيطية التى تعلوه فى الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، ثم فى الغلاف الأوسط (الميزوسفير). وكما ذكرنا سابقا، فإن العملية التى يغوص فيها الغلاف الصخرى فى الغلاف اللدن تسمى عملية الاندساس ، وتسمى الحافة التى تندس على امتدادها الألواح باسم نطاقات الاندساس . وتؤدى عملية الاندساس إلى تكوّن خندق trench ضيق طويل عند قاع المحيط (يبلغ عرضه نحو 100 كم).

وعندما تغوص حافة الغلاف الصخرى المتحركة ببطء فى الغلاف اللدن ، فإنها تدخل فى بيئة مرتفعة الحرارة والضغط . وتنصهر القشرة المحيطية الرقيقة الموجودة فوق الغلاف الصخرى الهابط وتتكون صهارة . وتصل بعض الصهارة إلى السطح لتكوّن براكين تتداخل فى اللوح العلوى الراكب overriding plate (سواء كان محيطيا أم قاريا). ونتيجة لذلك ، تتميز نطاقات الاندساس بوجود قوس من البراكين المتوازية ، ولكن على بعد يتراوح بين 150 إلى 400 كم من الخندق الذى يميز حافة اللوح ، حيث تعتمد تلك المسافة على زاوية ميل اللوح الهابط المندس .

نطاقات التصادم: يكون الغلاف الصخرى للقارات أخـف مـن أن يغـوص أو ينـدس فى الغـلاف اللـدن. ولذلك ، فإن كتل القشرة الأرضية التى تكون فى حجم القارات تطفو فوق ألواح الغلاف الصخرى من مكـان إلى مكان آخر فـوق سـطح الأرض. وتتوقـف الحركـة حينما تصطدم كتلتان من كتل القشرة القاريـة. ويحـدث مثل هذا التصادم فقط حيـنما يحـدث اندسـاس لقـشرة محيطية تحت كتلة واحدة من الكتلتين القاريتين . وحيث إن اللوح المحيطى المندس يحمل أيضا كتلة مـن القـشرة القارية ، فإنـه يُحْـدث تـصادما لا يمكـن تجنبـه عنـدما تتقابل الكتلتان القاريتان على امتداد نطاق الاندساس . وتكوّن نطاقات الاندساس سلاسل جبلية عالية ، مثـل جبال الهيمالايا وجبال الألب.

حدود الصدوع الناقلة

تنزلق الألواح أفقيا أمام بعضها البعض عند حـدود الصدوع الناقلة (شكل 12.1جـ) ، ولا تنشأ عنها قشرة أرضية جديدة كمـا يحدث عند الحدود المتباعدة ، كمـا لا يحدث تحطم أو اسـتهلاك للقـشرة كـما يحـدث عنـد الحدود المتقاربة فى الخنادق المحيطية . **والصدوع الناقلة transform fault boundaries** عبـارة عـن كسور رأسية عظيمة الامتداد تقطع الغلاف الصخرى ، مثل صـدع سـان انـدرياس San Andreas fault فى ولاية كاليفورنيا ، حيث ينزلق لوح المحيط الهادى قبالة لوح أمريكا الشمالية فى اتجـاه شـمال غـرب. وحيـث إن الألواح تنزلق قبالة بعضها البعض لملايين السنين ، فإنه تتواجد صخور مختلفة النوع والعمر على جانبى الصدع. ولا يحدث الانزلاق بلطف ، بل قد تتـشابك فى بعـض الأحيان حدود الألواح مما يؤدى إلى ثنى وطى الصخور على جانبى الصدع الناقل . وعندما يتكسر ذلـك الجـزء المتشابك ، فإن الصخر المنثنى يتحرك فجـأة ، وتتـسبب الانزلاقات الفجائية فى حدوث زلازل مدمرة.

IV التفاعلات بين طبقات الأرض الداخلية والخارجية

إذا نظرنا إلى كوكب الأرض من الفـضاء ، فـسنرى أن الأرض لا تتكون من صخور وتربة فحسب ، وإنـما سنرى دوامات عالقة من الـسحب ، وكـذلك امتـدادا شاسعا من المحيطات . ولذلك تقـسم البيئـة الفيزيائيـة للأرض إلى ثلاثة أقسام هى: الغلاف الجوى والغـلاف المـائى والغـلاف الـصخرى. **والغـلاف الجـوى atmosphere** هو ذلك الغلاف الرقيق من الغـازات الذى يحيط بالأرض ، والـذى يتميـز بوجـود دوامـات السحب ، ويصل سمكه إلى مئات الكيلومترات ، ويعد جزءا لا يتجزأ من كوكب الأرض . ولا يـوفر الغـلاف الجوى الهواء اللازم للحياة فقط ، بل يعمل على حمايتنـا من حرارة الشمس الحارقـة وإشـعاعاتها الخطـرة. بينـما يشمل **الغلاف المائى hydrosphere** طبقة المـاء غـير المـستمرة ، والتـى نراهـا فى ذلـك الامتـداد الـشاسع للمحيطـات . ويـشمل الغـلاف المـائى بالإضـافة للمحيطات خزانات الماء العـذب الموجـودة فى الأنهـار والبحيرات والكتل الجليدية ، إلى جانب الميـاه الجوفيـة (الأرضية) تحت سطح الأرض. أما **الغلاف الـصخرى**

lithosphere فهو ذلك الجزء الخارجى الصلب من الأرض، والذى نراه فى القارات والجزر. ويتكون الغلاف الصخرى أساسا من الصخور والحطام **الصخرى (الأديم) regolith** . وهو غطاء غير منتظم يتكون من حبيبات الصخر غير المتماسكة التى تغطى الأرض الصلبة . وبالإضافة إلى هذه الأغلفة الفيزيائية الثلاثة ، فهناك **الغلاف الحيوى biosphere** (كلمة bios من اليونانية بمعنى حياة) ، وهو يشمل كل أشكال الحياة على الأرض ، ويشمل أجزاء الغلاف الصخرى والمائى والجوى التى يمكن أن توجد بها الكائنات الحية

ومن المعروف الآن ، أن الحركة المستمرة للغلافين المائى والجوى اللذين يغلفان الأرض هى المسئولة عن العديد من ملامح سطح الأرض فى القارات. فبدون المياه فوق سطح الأرض لن توجد أنهار أو وديان أو مثالج أو حتى القارات بالصورة التى نعرفها. وبدون الغلاف الجوى المتحرك ، فلن توجد كثبان رملية فى الصحراء أو أى ميكانيكية لنقل الماء من المحيطات إلى الأرض. وحيث إن المادة تتحول باستمرار من أحد أغلفة الأرض إلى الآخر، فإنه تبرز هنا بعض الأسئلة ، مثل : لماذا يكون تركيب الغلاف الجوى ثابتا ؟ ولماذا لا يتغير ماء البحر ليصبح أكثر ملوحة أو أكثر عذوبة ؟ ولماذا يكون صخر عمره 2 بليون سنة له تركيب صخر نفسه عمره 2 مليون سنة؟. وتكمن الإجابة عن كل هذه الأسئلة فى أن عمليات الأرض الطبيعية تسير فى مسارات دورية. ولذلك تحافظ هذه العناصر على ثباتها، لأن الأجزاء المختلفة فى المسارات تعادل بعضها البعض، حيث تتساوى المواد المضافة مع المواد المزالة من الدورة. وهكذا، يمكن أن تشمل الدورة cycle عدة أغلفة وعدة عمليات تعمل بمعدلات زمنية مختلفة. والدورات الثلاث التالية هى أهم الدورات التى تحدث فى الغلاف الصخرى الصلب للأرض:

1- دورة الصخور **rock cycle** وهى تصف كل العمليات التى يتكون بها صخر من نوعية ما من النوعين الآخرين . فالصخور الرسوبية تتحول إلى الصخور المتحولة أو تنصهر لتنشأ الصخور النارية. وقد ترفع إلى سطح الأرض ليتم تعريتها لتتكون الرواسب التى تتصلب لتكوّن الصخور الرسوبية مرة ثانية .

2- الدورة المائية **hydrologic cycle** وهى تصف التحرك الدورى للماء من المحيط إلى الغلاف الجوى بالتبخر ، ثم إلى سطح الأرض عند سقوط الأمطار فتصبح مياها سطحية بالصرف السطحى (كمية المطر التى لا تتخلل الأرض) أو مياها جوفية groundwater تحت سطح الأرض ، ثم إلى المجارى المائية مرة أخرى فإلى البحر. وبالطبع، فالماء من أهم العوامل الجيولوجية ، حيث يعمل كمذيب لكثير من المركبات الكيمائية ، ويساعد على تجوية الصخور، ويمثل وسطا أساسيا لتكوين معظم الرواسب.

3- الدورة التكتونية **tectonic cycle** وهى تشمل تحركات وتفاعلات ألواح الغلاف الصخرى، والعمليات التى تحدث فى باطن الأرض وتسبب حركات الألواح.

والدورات الثلاث السابقة هى دورات وثيقة الصلة بعضها ببعض بسبب تداخل العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المسببة لها . وتشمل تلك الدورات الثلاث معظم الموضوعات التى سيتم مناقشتها فى هذا الكتاب. وهناك بالطبع عديد من الدورات الأخرى، مثل الدورة الجيوكيمائية geochemical cycle والتى تتبع تحركات العناصر الأساسية للحياة، وهى : الكربون والأكسيجين والكبريت والهيدروجين والفوسفور .

الملخص

1. علم الجيولوجيا هو العلم الذى يختص بدراسة الأرض وتاريخها ومكوناتها وتركيبها البنائى الداخلى ومظاهرها السطحية. ويهتم علم الجيولوجيا الفيزيائية - وهو أحد الفروع الرئيسية لعلم الجيولوجيا - بدراسة العمليات التى تدور فوق أو تحت سطح الأرض والمواد التى تشملها وتؤثر فيها تلك العمليات.

2. تدور حول الشمس ثمانية كواكب منها أربعة كواكب داخلية تتكون من أجسام صخرية ، وتكون صغيرة كثيفة وهى : عطارد والزهرة والأرض والمريخ ، بينما تتكون الكواكب الأربعة الخارجية المشترى وزحل وأورانوس ونبتون من أجسام أكبر حجما وأقل كثافة وذات غلاف جوى ، مكون من الهيدروجين والهيليوم . أما بلوتو فقد تدارس الفلكيون عام 2006م إمكانية إخراجه من زمرة كواكب المجموعة الشمسية لعدم انطباق التعريف الجديد للكوكب عليه ، إلا أن هذا الأمر لم يقرر بشكل نهائى بعد .

3. يرجع أصل المجموعة الشمسية إلى تصادمات المادة فى سحابة دوارة من الغازات والرماد الدقيق. ولقد أدت الجاذبية إلى تراكم المادة نحو المركز وزيادة كثافتها لتكوّن الشمس الابتدائية ، ثم تكوّن قرص من الغاز والغبار غلف الشمس الابتدائية سمى بالسديم الشمسى . وعندما يبدأ هذا القرص فى التبرد ، تتكون جسيمات كوكبية تتصادم وتتلاحم ؛ لتكوّن فى النهاية الكواكب الثمانية المكونة لمجموعتنا الشمسية منذ حوالى 4.5 بليون سنة.

4. حدثت عملية التمايز مبكرا فى تاريخ الأرض ، حيث كان كوكب الأرض ساخنا بدرجة كافية . ولقد أدت عملية التمايز إلى تغير كوكب الأرض من كوكب متجانس أصلا إلى كوكب مكوّن من طبقات مختلفة فى التركيب وهى : اللب والوشاح والقشرة ، التى تنقسم إلى قشرة محيطية يبلغ متوسط سمكها 8 كم وقشرة قارية يبلغ متوسط سمكها نحو 45 كم .

5. يمكن تقسيم الأرض طبقا لخصائصها الفيزيائية إلى أغلفة هى : (1) الغلاف الصخرى وهو النطاق

الخارجى من الأرض الصلبة ، ويتكون من صخر صلب. وتكون قاعدة الغلاف الصخرى المحيطى عند عمق حوالى 100 كم ، بينما تكون قاعدة الغلاف الصخرى القارى عند عمق حوالى 200 كم . (2) الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ويوجد أسفل الغلاف الصخرى ، وحتى عمق 350 كم وهو منطقة مرتفعة الحرارة تجعل الصخر ضعيفا وسهل التشوه. (3) الغلاف الأوسط وهو منطقة صلبة توجد أسفل الغلاف اللدن. ويوجد داخل اللب منطقتين مختلفتين فى الخصائص الفيزيائية ، ولكن لهما التركيب نفسه ، وهما اللب الداخلى الذى يكون صلبا واللب الخارجى الذى يكون منصهرا.

6. تفترض نظرية تكتونية الألواح أن الغلاف الصخرى يتكون من سبعة من الألواح الكبيرة وعدد آخر من الألواح الصغيرة التى تنزلق ببطء فوق الغلاف اللدن ، وبمعدل حركة يتراوح بين 1 سم و 12 سم فى العام .

7. تتميز ألواح الغلاف الصخرى بوجود ثلاثة أنواع من الحواف وهى : (1) الحواف المتباعدة (وتسمى مراكز انتشار)، (2) الألواح المتقاربة (وتشمل نطاقات الاندساس ونطاقات التصادم) ، (3) الصدوع الناقلة.

8. عندما يتواجد مركز انتشار فى قشرة محيطية ، فإنه يتميز بوجود حيد وسط المحيط. ويتميز مركز الانتشار الذى يسبب انشطار قارة بوجود خسيف عظيم فى القشرة القارية.

9. عندما يتحرك غلاف صخرى محيطى بعيدا بدرجة كافية عن مركز انتشار ساخن، فإنه يهبط فى الوشاح حيث يتكون نطاق اندساس . وتتميز نطاقات الاندساس بوجود الخنادق، وهى أعمق أجزاء فى المحيط. وعند عمق نحو 100 كم، فإن القشرة المندسة تصبح ساخنة بدرجة كافية وتنصهر فى النهاية ، وتصعد لتكوّن سلسلة من البراكين.

10. تقسم البيئة الفيزيائية للأرض إلى ثلاثة أغلفة هى: الغلاف الجوى والغلاف المائى والغلاف الصخرى ، كما يضاف إليها الغلاف الحيوى الذى يضم كل أشكال الحياة على الأرض.

11. أهم الدورات التى تصف أنشطة الأرض الصلبة هى : دورة الصخور والدورة المائية والدورة التكتونية . وتصف دورة الصخور أنواع الصخور الرئيسية الثلاث النارية والمتحولة والرسوبية ، والعلاقات بين عمليات ومواد الأرض التى تلقى الضوء على تحول أحد أنواع الصخور إلى النوع الآخر. وتصف الدورة المائية التحرك الدورى للماء بين المحيط والغلاف الجوى واليابسة. وتشمل الدورة التكتونية تحركات وتفاعلات ألواح الغلاف الصخرى والعمليات الداخلية التى تتم فى باطن الأرض.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.mhhe.com/plummer
http://www.prenhall.com/tarbuck
http://www.mhhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhtml
http://www.geology.com/
http://www.geosociety.org/

المصطلحات المهمة

abyssal plain	سهل سحيقى	lithosphere	الغلاف الصخرى (الليثوسفير)
actualism	مبدأ الواقعية	magma	صهارة
asthenosphere	الغلاف اللدن (الأسثينوسفير)	mantle	وشاح
atmosphere	الغلاف الجوى	mesosphere	الغلاف الأوسط (الميزوسفير)
biosphere	الغلاف الحيوى	mid-ocean ridges	حيود وسط المحيط
catastrophism	نظرية الكوارث (الكوارثية)	nebular hypothesis	الفرضية السديمية
collision zone	نطاق الاصطدام	oceanic crust	قشرة محيطية
continental crust	قشرة قارية	oceanic ridges	حيود محيطية
continental drift	انجراف قارى	Pangaea	بانجيا
continental rise	ارتفاع قارى	physical geology	الجيولوجيا الفيزيائية
continental shelf	رف قارى	plate	لوح
continental slope	منحدر قارى	regolith	حطام صخرى (أديم)
convergent boundaries	حدود متقاربة	rift valley	وادى خسف
core	لب	rock	صخر
crust	قشرة	rock cycle	دورة الصخور
differentiation	تمايز	seafloor spreading	انتشار قيعان المحيطات
divergent boundaries	حدود متباعدة	subduction	الاندساس
evolution, theory of	نظرية التطور	subduction zone	نطاق الاندساس
geologic time scale	مقياس الزمن الجيولوجي	tectonic cycle	دورة تكتونية أو بنائية
geology	جيولوجيا (علم الأرض)	plate tectonics, theory of	نظرية تكتونية الألواح
Gondwanaland	أرض الجندوانا	transform fault boundaries	حدود صدع ناقل
historical geology	الجيولوجيا التاريخية	trench (oceans)	خندق (محيطات)
hydrologic cycle	الدورة المائية	uniformitarianism, principle of	مبدأ الوتيرة الواحدة
hydrosphere	الغلاف المائى		
Laurasia	لوراسيا		

الأســــئلة

1- يشمل علم الجيولوجيا مجالين رئيسين ، صفهما .

2- وضـح كيـف يـساعد مبـدأ الـوتيرة الواحـدة الجيولوجيين على فهم تاريخ الأرض.

3- صـف باختـصار الخطـوات التـى تكونـت بهـا الكواكب من السحابة الضخمة المكونة من الغـاز والغبار.

4- ما السبب فى تمايز الأرض ، وما نتيجة هذا التمايز؟

5- كيف تختلف الكواكـب الداخليـة عـن الكواكـب الخارجية ولماذا ؟

6- يمكـن تقـسيم الأرض إلى أغلفـة اعـتمادا عـلى خصائصها الفيزيائية ، صف تلك الأغلفة .

7- كيف ولماذا يتغير سمك الغلاف الصخرى؟ قارن بين الغلافين الصخرى واللدن .

8- اذكر وصف باختصار الأغلفة التى تكوّن بيئتنا .

9- لاتمثـل الـشواطئ الحاليـة الحـد بـين القـارات والمحيطات ، اشرح .

10- باستخدام دورة الصخور ، وضح كيـف يتحـول أحد أنواع الصخور الثلاثة إلى نوع آخر.

11- صف المعالم الطوبوغرافية لقاع المحـيط ، ووضـح كيف ترتبط بتكتونية الألواح.

12- اشرح الفكرة الأساسية لنظرية تكتونية الألـواح . صف باختصار أنواع حدود الألواح الثلاثة.

13- هـل تظـل عمليـات دورة الـصخور والـدورة التكتونية والدورة المائية ثابتة عـلى امتـداد الـزمن الجيولوجى ؟ اشرح ذلك .

14- ما اســم اللوح التكتـونى الـذى تعـيش عليــه ، وما الألواح التى تحيط به ؟

15- أين تنشأ صخور القـشرة ؟ ولمـاذا تحـتفظ الأرض بحجمها دون زيادة ؟

الفصل 2

المعادن : الوحدة البنائية للصخور

I. تعريف المعدن

II. المعادن وتركيبها الكيميائى :

أ. تركيب الذرات

ب. العدد الذرى والكتلة الذرية

III. التفاعلات الكيميائية :

أ. اكتساب أو فقد الإلكترونات

ب. المساهمة فى الإلكترون

ج. الجدول الدورى للعناصر

IV. الروابط الكيميائية :

أ. الروابط الأيونية

ب. الروابط التساهمية

V. التركيب الذرى للمعادن :

أ. طريقة تكوين المعادن

ب. الإحلال الأيونى

VI. المعادن المكونة للصخور :

أ. السيليكات

ب. الكربونات

ج. الأكاسيد

د. الكبريتيدات

هـ. الكبريتات

VII. الخواص الفيزيائية للمعادن :

أ. الصلادة

ب. الانفصام

ج. المكسر

د. البريق

هـ. اللون والمخدش

و. الكثافة والكثافة النوعية

ز. هيئة البلورة

VIII. المعادن كأدلة على بيئات التكوين

تعتبر صخور القشرة الأرضية ، وأيضا مياه المحيطات ، مصدرا لعديد من المعادن المهمة . وفى الواقع ، فإن كل منتَج مصنّع يحتوى عمليا على مواد مستمدة من المعادن . ويعرف معظم الناس الاستعمالات العادية لعديد من الفلزات الأساسية ، والتى تشمل الألومنيوم المستخدم فى علب المشروبات الغازية وخلافها ، والنحاس المستخدم فى شبكات الأسلاك الكهربائية ، والذهب والفضة المستخدمين فى الحلى . بينما لا يدرك البعض أن أقلام الرصاص تحتوى على معدن الجرافيت ، وأن مصدر بودرة التلك التى تستخدم للأطفال هى صخور متحولة مكونة من معدن التلك ، وأن معظم رمال شواطئ الساحل الشمالى بمصر تتكون من حبيبات معدن الكوارتز . كما أن البعض قد لا يعرف أن مثقاب الحفر الذى يستخدم لحفر طبقات الصخور أثناء البحث عن البترول يكون مطعمًا بحبيبات من معدن الماس ، وأن معدن الكوارتز هو أحد المكونات الرئيسية لمادة الزجاج . ونتيجة لزيادة طلب المجتمعات الحديثة على المواد الخام ، فإن الحاجة تزداد لاكتشاف مواقع جديدة لمعادن مهمة .

وقد ساهمت المعادن فى بناء الحضارة الإنسانية ، حيث نجد فى آثار قدماء المصريين ما يدلنا على أنهم أنشأوا مناجم للذهب منذ آلاف السنين ، فقد استخلصوا هذا المعدن النفيس من العروق الحاملة له . كما استعمل قدماء المصريين معدن الهيماتيت الأحمر - وهو أحد معادن الحديد - فى طلاء مقابرهم ، كما استخلصوا معادن النحاس الأخضر والأزرق ، واستخدموها فى طلاء مقابرهم وصناعة الأدوات المختلفة منها بعد استخراج فلز النحاس . كما بحث قدماء المصريين عن الأحجار الكريمة واستعملوها فى صناعة الحلى للزينة . وتسهم المعادن منذ ذلك التاريخ بنصيب وافر فى تطور الحضارة الإنسانية ، حتى أن هناك عصورا تعرف باسم المعدن الذى كان الاستخدام شائعًا فيها ، مثل عصر الحديد وعصر النحاس ، حتى عصرنا الحاضر الذى يعرف بعصر الذرة ، والتى نحصل عليها أساسا من تحطيم فلز اليورانيوم المشع .

وبالإضافة إلى الاستخدامات الاقتصادية للصخور والمعادن ، فإن كل العمليات التى حدثت فى الماضى وتدخل فى إطار علم الجيولوجيا ، مثل : التدفقات البركانية وبناء الجبال والتجوية والتعرية والزلازل ، تعتمد بصورة ما على خصائص تلك المواد الرئيسية المكونة للأرض . فتُقدّم المعادن الموجودة فى بعض الصخور البركانية الدليل على ثورة بركان ، والذى يؤدى إلى تواجد صخر منصهر يتدفق إلى سطح الأرض عند درجة حرارة عالية ، قد تصل إلى نحو 1000°م .

أما معادن صخر الجرانيت فإنها تقدم الدليل على تبلـور هذا الـصخر فى أعـماق القـشرة الأرضـية . ويمكـن أن نـشاهد الظـروف الجيولوجيـة التـى تحـدث فى أعـماق القـشرة الأرضـية فى منـاطق تـصادم لـوحين قـاريين ، حيث تؤدى عملية التصادم إلى وجود درجة حرارة قـد تصل إلى 700°م وضغط أكثر من 10000 مـرة ضـعف الضغط الجوى العادى عند سطح الأرض؛ مما يؤدى إلى تكون هذا الصخر فى هذا الموضع تحت تلك الظروف .

وتعتبر هـذه الطريقـة فى الاسـتدلال أساسـية حـين نحـاول فهـم جيولوجيـة منطقـة مـا ، وتحديـد أنـواع الصخور بها ومحاولة الكشف عن موقع غـير مكتـشف لراسب مهم اقتصاديا مثل بعض خامات الفلزات .

ويعتبر علم المعادن **mineralogy** أحد فروع علم الجيولوجيـا ، وهــو مــن أهــم مــصادر الاسـتدلال الجيولوجى . وهو يتناول دراسـة التركيـب الكيميـائى وبنية وخواص المعادن ومظهرها واسـتقرارها وأمـاكن تواجدها ، والمعادن الأخرى المصاحبة لهـا. وسـنعرض فى هذا الفصل لدراسة المعـادن ، والتـى تعتـبر الوحـدة البنائية للصخور .

أ ـ تعريف المعدن

يعرّف الجيولوجيـون المعـدن **mineral** بأنـه مـادة صلبة متبلورة ، غير عضوية عامة ، لها تركيب كيميـائى ثابت أو متغـير فى مـدى محـدود ، تتواجـد فى الطبيعـة. والمعدن هو الوحدة البنائية للصخور ، والتى تتكون من مجموعــات متنوعــة مــن المعــادن. والمعــادن تكــون متجانسة، ولا يمكن تقـسيمها بـالطرق الميكانيكيـة إلى مكونات أصغر. أما معظم الصخور فيمكن فـصلها إلى مكوناتها المعدنية باستخدام وسائل مناسبة. وهناك قلـة من الصخور مثل الحجر الجيرى تحتوى على نوع واحـد من المعادن هو الكالسيت ، بينما هناك صخور أخـرى ، مثل الجرانيت، تتكون ليس من معدن واحد ، وإنما مـن عـدد مـن المعـادن. ولكـى نعـرف ونـصنف الأنـواع المختلفة من الـصخور الموجـودة عـلى الأرض وكيـف تكوّنت ، فإننا يجب أن ندرس المعادن المكونة لها.

ونعود إلى التعريـف الـسابق للمعـدن ، فنجـد أنـه ينص على أن المعدن يتكون من مادة صـلبة ومتبلـورة ، مما يعنى استبعاد كل السوائل والغازات . وعندما نقول إن المعـــدن متبلـــور crystalline ، فإننـــا نقـــصد أن الجزيئات الصغيرة المكونة له ـ الذرات ــ تكـون مرتبـة بنظام ثابت فى الأبعاد الرئيسية الثلاثة . وتوصف المـواد الـصلبة التـى ينقـصها الترتيـب المـذكور بأنهـا مـادة زجاجيـةglassy أو غـير متبلـورة amorphous . فزجاج النوافـذ يكـون غـير متبلـور مثلـه مثـل بعـض الزجـاج المتكـون فى الطبيعـة خـلال ثـورة البراكـين. وبالتالى فإن كل المواد غير المتبلورة لا تعتبر من المعادن . ولكى يطلق على المادة مصطلح معـدن ، فإنهـا يجـب أن توجد فى الطبيعة . مثل الماسات المستخرجة من منـاجم الماس فى جنوب إفريقيا . أما المـاس المـصنع فى المعامـل فلا يمكن اعتباره من المعادن ، مثله مثل آلاف المنتجات الصناعية التى يخلقها الكيميائيون.

ويشترط فى المعادن أن تكون من مواد غير عضوية ، وذلك يرجع إلى استخدام تـاريخى للمـصطلح يـستبعد

المواد العضوية التى تكوّن أجسام النباتات والحيوانات من المعادن ، حيث إن هذه المواد العضوية تكون مكونة من كربون عضوى ، وهو أحد أشكال الكربون الموجود فى كل المواد العضوية. وقد تتحول بقايا النباتات المتحللة إلى الفحم ، الذى هو بالتالى مكوّن من كربون عضوى . وعلى الرغم من أن هذا الفحم يوجد فى الطبيعة أيضا ، إلا أن العرف جرى على عدم اعتباره من المعادن. وعلى الجانب الآخر، فهناك عديد من المعادن التى تفرزها الكائنات الحية، والتى تحتوى على كربون غير عضوى ، مثل معدن الكالسيت الذى تفرزه العديد من الكائنات الحية لتكوّن هياكلها وتبنى منه صخور الحجر الجيرى . ويكون الكالسيت فى هذه الحالة غير عضوى ومتبلور، وينطبق عليه تعريف المعدن .

كما يجب أن يكون للمعدن تركيب كيميائى ، قد يكون ثابتا أو متغيرا فى حدود معينة . مما يعنى استبعاد الزجاج حيث إن له تركيبًا غير ثابت ، وكذلك المخاليط التى لا يمكن التعبير عنها بصيغة كيميائية محددة . فالتركيب الكيميائى لمعدن الكوارتز مثلاً عبارة عن ذرتى أكسيجين وذرة واحدة من السيليكون. وهذه النسبة ثابتة لا تتغير أبدا ، على الرغم من أن الكوارتز يوجد فى الكثير من الصخور المختلفة التركيب . أما معدن الأوليفين فيتكون من عناصر الحديد والماغنسيوم والسيليكون بنسبة ثابتة أيضا . وعلى الرغم من أن نسبة ذرات الحديد إلى الماغنسيوم فى هذا المعدن يمكن أن تتغير ، إلا أن مجموع هذه الذرات إلى عدد ذرات السيليكون يكون ثابتا دائما. ويستخدم مصطلح مجموعة معدنية **mineral group** لوصف المعدن الذى يحدث فيه إحلال كاتيونى ، دون تغير فى نسبة الكاتيونات إلى الأنيونات .

أشباه المعادن: يوجد فى الطبيعة بعض مركبات صلبة لا ينطبق عليها تعريف المعدن ، لأنه ينقصها التركيب الكيميائى المحدد أو الثابت أو البنية البلورية أو كلاهما. ومن أمثلة ذلك الزجاج الموجود فى الطبيعة والذى يكون تركيبه الكيميائى غير ثابت ومتغير وغير متبلور. ومن أمثلة ذلك أيضا الأوبال ، والذى يكون له تركيب كيميائى ثابت ولكنه غير متبلور. ويطلق مصطلح شبه معدن **mineraloid** لوصف مثل هذه المواد.

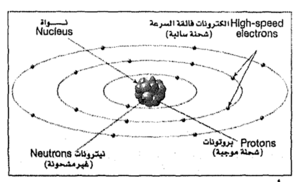
II المعادن وتركيبها الكيميائى

يبلغ عدد العناصر المعروفة فى الوقت الحاضر أكثر من مائة عنصر، بينما يبلغ ما تم تحضيره منها إلى الآن نحو 18 عنصرا . وتتكون معظم المعادن من عنصرين أو أكثر تتحد معا لتكوّن مركبا ثابتا ، بينما يتكون القليل منها من عنصر واحد فقط مثل : الذهب والماس والجرافيت . وتتحد العناصر مع بعضها لتكوين مركبات ، ولنفهم كيف يتم ذلك فلابد أن نفهم تركيب الذرة. فالذرة **atom** هى أصغر وحدة فى بناء العنصر وتحتفظ بخواصه الفيزيائية والكيميائية. كما أنها أصغر وحدات المادة التى تدخل فى التفاعلات الكيميائية، إلا أن الذرة نفسها يمكن أن تنقسم إلى وحدات أصغر.

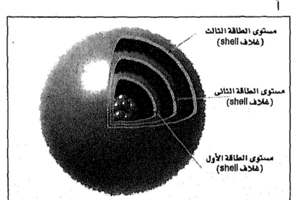
ولنتعرف المعادن بصورة واضحة، فإننا يجب أن نفحص أهم خاصيتين للمعادن وهما التركيب composition (أى مجموعة العناصر الكيميائية الموجودة بالمعدن وخصائصها) وكذلك البنية البلورية crystal structure (أى الطريقة التى يتم بها ترتيب ورص ذرات العناصر الكيميائية فى شكل هندسى منتظم الأبعاد لتكون المعدن). ونظراً لأن معظم المعادن تحتوى على العديد من العناصر الكيميائية، فإنه من الأفضل أن نبدأ مناقشتنا باستعراض سريع لتركيب الذرات والطريقة التى تتحد بها العناصر الكيميائية لتكون المركبات.

أ- تركيب الذرات

يتيح فهم تركيب الذرة التنبؤ بكيفية تفاعل العناصر الكيميائية مع بعضها بعضا لتكوين بنيات بلورية جديدة. وتتكون كل ذرة من نواة **nucleus** تتوسطها وتحتوى على البروتونات **protons** والنيترونات **neutrons** التى تمثل كامل كتلة النواة. وكتلة البروتون تساوى كتلة النيترون تقريبا، ولكن تحمل البروتونات شحنات كهربية موجبة (+1) بينما لا تحمل النيترونات أى شحنة، أى تكون متعادلة الشحنة. وقد تحتوى ذرات العنصر الواحد على عدد مختلف من النيترونات فى نظائر العنصر المختلفة، بينما يكون عدد البروتونات ثابتا لا يتغير للعنصر الواحد. ويحيط بالنواة سحابة متحركة من الإلكترونات**electrons** لها كتلة متناهية فى الصغر، يمكن إهمال كتلتها، ويحمل الإلكترون شحنة كهربية سالبة واحدة (-1). ويعادل عدد البروتونات فى نواة أى ذرة نفس عدد



أ



ب

شكل (1.2): نموذجان للذرة

أ) رسم مبسط جدا للذرة التى تتكون من نواة فى المركز تحتوى على بروتونات ونيترونات، يحيط بها إلكترونات تدور بسرعة عالية فى مدارات ثابتة متحدة المركز حول النواة.

ب) نموذج آخر للذرة يتكون من سحابات من الإلكترونات، التى تنتظم فى أغلفة كروية تحيط بالنواة. ويكون حجم الإلكترونات متناهٍ فى الصغر مقارنة بالبروتونات والنيترونات، كما أن المسافة النسبية بين النواة وأغلفة الإلكترونات تكون أكبر بكثير مما هو موضح فى الشكل.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

الإلكترونات التى توجد فى السحابة الخارجية حولها، وبذلك تصبح أى ذرة متعادلة كهربيا. وتحدد الأبحاث الحديثة لتركيب الذرة مواقع الإلكترونات .

وتنتظم الإلكترونات حول النواة فى مدارات orbits ، تكون كأغلفة كروية أو كسحابة من الإلكترونات السالبة الشحنة تحيط بالنواة ، وليس كمدارات ثابتة ، وللتسهيل فإننا نرسم المدارات كدوائر متحدة المركز حول النواة (شكل 1.2).

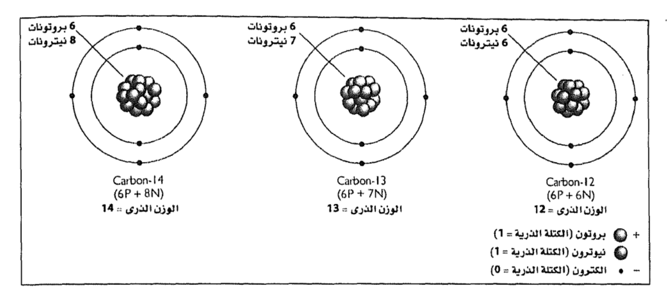
ب ـ العدد الذرى والكتلة الذرية

يطلق على عدد البروتونات فى نواة أى ذرة اسم العدد الذرى أو الرقم الذرى **atomic number** ، وحيث إن كل ذرات العنصر الواحد يكون بها نفس العدد من البروتونات، فإنها يكون لها بالتالى العدد الذرى نفسه. فكل الذرات التى تحتوى على ستة بروتونات هى ذرات عنصر الكربون (العدد الذرى 6) ، وكل الذرات التى تحتوى على ثمانية بروتونات هى ذرات أكسيجين وهكذا. ويحتوى كل عنصر على عدد من الإلكترونات مساو لعدد البروتونات فى نواة الذرة . ويحدد العدد الذرى للعنصر طريقة تفاعله كيميائيا مع بقية العناصر.

أما **الكتلة الذرية أو الوزن الذرى atomic mass** لعنصر ما فهو مجموع كتل البروتونات والنيترونات الموجود فى نواة تلك الذرة . وقد تحتوى ذرات العنصر الكيميائى نفسها على أعداد مختلفة من النيترونات، ويكون لها بالتالى كتل ذرية مختلفة ، ويطلق على هذه الأنواع المختلفة من الذرات اسم **النظائر isotopes**. فنظائر عنصر الكربون التى تحتوى على ستة بروتونات، تحتوى على 6 أو 7 أو 8 نيترونات ، وبالتالى تكون هناك ثلاث كتل ذرية لهذه النظائر الثلاثة وهى كربون - 12 و13 و14على التوالى (شكل 2.2) . ويتواجد العنصر الكيميائى فى الطبيعة كخليط من نظائره المختلفة ، وبالتالى فإن الكتل الذرية لا يمكن أن تكون رقما صحيحا. فالكتلة الذرية لعنصر الكربون هى 12.011 وهى قريبة من الرقم 12 لأن نظير الكربون - 12 هو الأكثر شيوعا عموما. وتحدد العمليات الجيولوجية نسبة تواجد النظائر المختلفة لعنصر ما على الأرض ، مما يزيد من معدل انتشار بعض النظائر عن النظائر الأخرى. فالكربون-12 مثلاً تفضله بعض التفاعلات الحيوية مثل البناء الضوئى photosynthesis حيث يتم إنتاج مركبات كربون عضوية من مركبات كربون غير عضوية .

III. التفاعلات الكيميائية

يحدد تركيب الذرة تفاعلاتها الكيميائية مع الذرات الأخرى. فالتفاعلات الكيميائية **chemical reactions** هى تفاعلات لذرات عنصرين كيميائيين أو أكثر بنسب ثابتة لتنتج مواد كيمائية جديدة هى المركبات الكيميائية. فعندما تتحد ذرتا هيدروجين مع ذرة أكسجين ، يتكون مركب كيميائى جديد اسمه الماء (H_2O) . وقد تختلف خصائص المركب الكيميائى الناتج كلية عن العناصر المكون منها . فمثلا ، عندما تتحد ذرة صوديوم مع ذرة كلور يتكون كلوريد



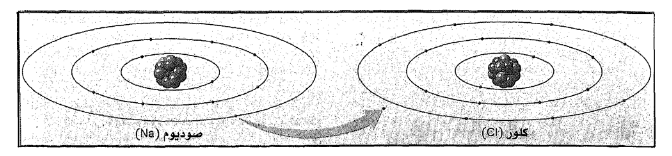
شكل (**2.2**): ثلاثة نظائر لعنصر الكربون ، يحتوى كل منها على العدد نفسه من البروتونات ، وبالتالى يكون لها العدد الذرى نفسه وهو ستة ، بينما تختلف الكتل الذرية لنظائر الكربون لأنها تحتوى على أعداد مختلفة من النيترونات.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

الصوديوم، والمعروف باسم ملح الطعام . ويعبر عن هذا المركب بالصيغة الكيميائية NaCl . وتحدث التفاعلات الكيميائية بالتفاعل بين الإلكترونات الموجودة فى مداراتها الخارجية . وحيث إن معظم ذرات العناصر تحتوى على عدد من الإلكترونات أقل من الحد الأقصى الذى تسمح به مداراتها ، فإن كل الذرات تميل إلى أن تكمل مداراتها الخارجية لتصبح مستقرة كيميائيا مثل الغازات الخاملة كالنيون والأرجون. وتعنى قاعدة الثمانيات octet rule أن تتحد الذرات ببعضها ببعض بحيث يناظر تركيب الإلكترونات بها ما هو موجود فى أقرب غاز خامل لها ، حيث يحتوى المدار الخارجى لها على 8 إلكترونات. لذلك فإن هذه الغازات مستقرة كيميائيا ولا تتفاعل مع بعضها البعض أو مع غيرها من العناصر. ولكى نفهم هذه التفاعلات فإننا نحتاج لمعرفة عدد الإلكترونات فى ذرة ما ، وكيفية ترتيبها فى أغلفة الإلكترونات .

أ. اكتساب أو فقد الإلكترونات

تنتظم الإلكترونات حول نواة الذرة فى مجموعة من الأغلفة المتحدة المركز، والتى تعرف بأغلفة الإلكترونات (المدارات) ، حيث يحتوى كل منها على عدد محدد من الإلكترونات. وفى التفاعلات الكيميائية لمعظم العناصر، فإن الإلكترونات الموجودة فى الأغلفة الخارجية **shells** هى التى تدخل فى التفاعلات فقط . ففى التفاعل بين الصوديوم (Na) والكلور (Cl) ليكونا ملح الطعام (NaCl) ، فإن الصوديوم يفقد إلكترونا من الغلاف الخارجى ، بينما تكتسب ذرة الكلور هذا الإلكترون فى غلافها الخارجى (شكل 3.2).



شكل (3.2): الترابط الكيميائى للصوديوم والكلور ، نتيجة انتقال الإلكترون الوحيد الموجود فى الغلاف الخارجى لذرة الصوديوم إلى ذرة الكلور ، مما يؤدى إلى تكوين أيون صوديوم موجب (Na^{+}) وأيون كلور سالب (Cl^{-}) . ويرجع الترابط الكيميائى إلى تكوين مركب كلوريد الصوديوم (NaCl) نتيجة للتجاذب الإلكتروستاتيكى بين الأيونات الموجبة والسالبة .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

الأيونات: يؤدى اكتساب أو فقد الذرة لأحد إلكتروناتها الخارجية أن تصبح غير متعادلة كهربيا. فعندما تفقد ذرة الصوديوم إلكترونا فإنها تتحول إلى أيون صوديوم يحمل شحنة كهربية موجبة (+1) . ويرمز للأيون بالرمز (Na^{+}) وعندما تكتسب ذرة الكلور إلكترونا، فإنها تصبح أيون كلور يحمل شحنة كهربية سالبة واحدة (-) ، ويرمز له بالرمز (Cl^{-}) . وتسمى الأيونات الموجبة كاتيونات **cations** مثل أيون الصوديوم، بينما تسمى الأيونات السالبة أنيونات **anions** مثل أيون الكلور. أما المركب الكيميائى كلوريد الصوديوم NaCl فإنه يكون متعادلا كهربيا ، لأن الشحنة الكهربية على الصوديوم Na^{+} تتعادل تماماً مع الشحنة السالبة على الكلور Cl^{-} . ويتحد عدد من الأيونات ليكون أيونات مركبة complex ions مثل أيون الكبريتات الشائع (SO_4^{2-}) ، وهو أحد مكونات معدن الأنهيدريت ($CaSO_4$)، وهو مركب شائع فى ماء البحر. وأيون الكبريتات عبارة عن وحدة مكونة من أيون كبريت واحد يحمل ست شحنات موجبة (+6) وأربعة أيونات أكسيجين يحمل كل منها شحنتين سالبتين لتتبقى شحنتان سالبتان ، (-2) .

أغلفة الإلكترونات واستقرار الأيون: تحتوى ذرة الصوديوم على إلكترون واحد فى غلافها الخارجى قبل التفاعل مع الكلور ، وعندما تفقد ذرة الصوديوم هذا الإلكترون، فإنها تفقد بالتالى هذا الغلاف ويصبح الغلاف الذى يليه ، والذى يحتوى على ثمانية إلكترونات هو الغلاف الخارجى (أقصى ما يحتمله أى مدار هو ثمانية إلكترونات) ، وتحتوى ذرة الكلور على سبعة إلكترونات فى غلافها الخارجى (قبل التفاعل) مع وجود مكان لإلكترون آخر حتى يصبح عدد الإلكترونات فى هذا الغلاف ثمانية إلكترونات . وباكتساب هذا الإلكترون ، فإن الغلاف الخارجى لأيون الكلور يصبح مشبعا . وتميل معظم العناصر بقوة إلى أن يكون لها غلاف إلكترونى خارجى مشبع .

عـــن طريـــق فقـــد أو اكتســـاب إلكترونـــات أثنـــاء التفاعلات الكيميائية.

ب ـ المساهمة فى الإلكترونات

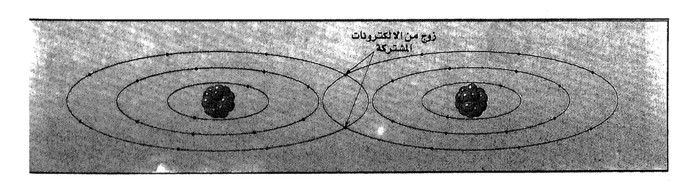
لا تتفاعل كل العناصر الكيميائية مع بعضها بعضا باكتساب أو فقد إلكترونات ، وإنما يكون لـدى الكثير منها القدرة على الاتحاد مـع بعـضها بعـضا عـن طريـق المشاركة فى الإلكترونات **electron sharing** مع ذرات العنـصر نفـسه أو عنـصر آخـر ، للوصـول إلى الاسـتقرار المطلـوب للإلكترونـات . ويميـل عنـصرا الكربون والسيليكون وهما من أكثر العناصر انتـشاراً فى القشرة الأرضية ، إلى المشاركة فى الإلكترونات.

ويوضح شكل (4.2) مساهمة إلكترونين من ذرتـى كلور ليكونا جزيئا من غاز الكلـور . وعنـدما تتـداخل المـــدارات الخارجيـــة للإلكترونـــات ، فـــإن أحـــد الإلكترونـات الـسبعة الموجـودة فى المـدار الخـارجى لإحدى ذرتى الكلـور تكمـل المـدار الخـارجى للـذرة المشاركة معها مكونة الثمانى المستقر.

ويتكون معدن الماس مـن عنـصر الكربـون فقـط. وبكـــل ذرة كربـــون أربعـــة إلكترونـــات فى غلافهـــا الخارجى، وتتـشارك كـل ذرة كربـون مـع أربـع ذرات كربون مجـاورة لهـا (شـكل 6.2 أ) . وعنـدما تتـشارك الإلكترونات ، فإن كل الذرات تظهر كما لو أن كـل ذرة يدور حولها ثمـانية إلكترونـات فى غلافهـا الخـارجى. ولا يمكن اعتبار هذه الإلكترونات المـشاركة اكتـسبت أو فقدت. ولا تسمى هذه الذرات بالأيونـات ، حيـث إن الـــذرات مازالـــت تمتلـــك عـــددها الأصـــلى مـــن الإلكترونات.

ج ـ الجدول الدورى للعناصر

لقد عـرف الكيـائيـون منـذ زمـن طويـل أن بعـض مجموعات العناصر لها الخـصائص الكيميائيـة نفـسها ، مثل درجة الغليان ودرجـة الانـصهار والميـل للتفاعـل كيميائياً مع عناصر أخرى، وتختلف هـذه المجموعـات



شكل (**4.2**): شكل يوضح المشاركة فى الإلكترونات بين ذرتى كلور ليكونا جزيئًا من الكلـور. ويلاحـظ أن عمليـة المـشاركة فى الإلكترونـات تؤدى إلى أن تحمل كل من ذرتى الكلور ثمانية إلكترونات فى مدارها الخارجى.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

بوضوح عن بعضها البعض. وحينما أصبح التركيب الذرى للعناصر معروفًا، فقد اتضح أن الخصائص الكيميائية ترجع إلى تركيب أغلفة الإلكترونات لهذه العناصر.

ويرتب الجدول الدورىperiodic table (شكل 5.2) العناصر (من اليسار إلى اليمين على امتداد الصف) طبقاً للعدد الذرى (عدد البروتونات) مما يعنى فى الوقت نفسه زيادة عدد الإلكترونات فى المدار الخارجى للعناصر فى الاتجاه نفسه. فمثلا يبدأ الصف الثالث على اليسار بعنصر الصوديوم (عدده الذرى 11) والذى يحتوى على إلكترون واحد فى المدار الخارجى، يليه الماغنسيوم (عدده الذرى 12) ويحتوى على إلكترونين فى المدار الخارجى، فالألومنيوم (عدده الذرى 13) ويحتوى على 4 إلكترونات فى المدار الخارجى ، فالسيليكون (عدده الذرى 14) ويحتوى على 4 إلكترونات فى المدار الخارجى ، فالفوسفور (عدده الذرى 15 ويحتوى على 5 إلكترونات فى المدار الخارجى) ، فالكبريت (عدده الذرى 16 ويحتوى على 6 إلكترونات فى المدار الخارجى) ، فالكلور (عدده الذرى 17 ويحتوى على 7 إلكترونات فى المدار الخارجى). والعنصر الأخير فى هذا الصف هو الأرجون (عدده الذرى 18 ويحتوى على 8 إلكترونات فى المدار الخارجى ، وهو أقصى عدد ممكن من الإلكترونات فى المدار الخارجى. ويكوّن كل عمود فى الجدول الدورى مجموعة رأسية من العناصر ، تتميز بغلاف خارجى من الإلكترونات به عدد الإلكترونات نفسه.

العناصر التى تميل لفقد الإلكترونات: تتميز كل العناصر الموجودة فى العمود الموجود فى أقصى يسار الجدول الدورى بوجود إلكترون واحد فى مدارها الخارجى ، وتميل بشدة إلى فقد هذا الإلكترون فى التفاعلات الكيميائية. ومن هذه المجموعة عناصر الهيدروجين (H) والصوديومNa)) والبوتاسيوم (K) التى توجد بوفرة كبيرة على سطح الأرض ، وفى قشرتها الخارجية. ويلى هذه المجموعة الرأسية العمود الثانى من اليسار ، والذى يحتوى على عنصرين شائعين أيضا فى القشرة الأرضية وهما الماغنسيوم (Mg) والكالسيوم (Ca) . وكل العناصر فى هذا العمود يوجد بها إلكترونان فى مدارها الخارجى ، وتميل بشدة إلى فقد هذين الإلكترونين أثناء التفاعلات الكيميائية.

العناصر التى تميل لاكتساب الإلكترونات: يشمل العمودان الرأسيان يمين الجدول الدورى مجموعة العناصر التى تميل إلى اكتساب الإلكترونات فى مداراتها الخارجية ومنها عنصرا الأكسيجين (O) أكثر العناصر انتشاراً فى الأرض ، والفلور (F) وهو غاز ضار بالصحة. فالعناصر الموجودة فى العمود الذى يبدأ بعنصر الأكسيجين تحتوى على 6 إلكترونات فى أغلفتها الخارجية وتميل إلى اكتساب إلكترونين ليتشبع مدارها الخارجى بثمانية إلكترونات . أما العناصر التى توجد فى العمود الذى يبدأ بعنصر الفلور فتحتوى على 7 إلكترونات فى أغلفتها الخارجية وتميل إلى اكتساب إلكترون واحد.

- Metals
- Transition metals
- Nonmetals
- Noble gases

1 H 1.0080 Hydrogen

- Atomic number (الرقم الذرى)
- Symbol of element (رمز العنصر)
- Atomic weight (الوزن الذرى)
- Name of element (أسم العنصر)

Light Metals — عناصر تميل لأن تفقد الإلكترونات فى المدار الخارجى لتكشف الغلاف الكامل الذى يليه

Transitional Elements — عناصر تميل لفقد الالكترونات

Nonmetals — عناصر تميل لأن تكمل المدار الخارجى عن طريق مشاركة الالكترونات — عناصر تميل لاكتساب الالكترونات لتكمل المدار الخارجى

الغازات النبيلة (الخاملة)

	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB			IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1	1 H 1.0080 Hydrogen																	2 He 4.003 Helium
2	3 Li 6.939 Lithium	4 Be 9.012 Beryllium											5 B 10.81 Boron	6 C 12.011 Carbon	7 N 14.007 Nitrogen	8 O 15.9994 Oxygen	9 F 19.998 Fluorine	10 Ne 20.183 Neon
3	11 Na 22.990 Sodium	12 Mg 24.31 Magnesium											13 Al 26.98 Aluminum	14 Si 28.09 Silicon	15 P 30.974 Phosphorus	16 S 32.064 Sulfur	17 Cl 35.453 Chlorine	18 Ar 39.948 Argon
4	19 K 39.102 Potassium	20 Ca 40.08 Calcium	21 Sc 44.96 Scandium	22 Ti 47.90 Titanium	23 V 50.94 Vanadium	24 Cr 52.00 Chromium	25 Mn 54.94 Manganese	26 Fe 55.85 Iron	27 Co 58.93 Cobalt	28 Ni 58.71 Nickel	29 Cu 63.54 Copper	30 Zn 65.37 Zinc	31 Ga 69.72 Gallium	32 Ge 72.59 Germanium	33 As 74.92 Arsenic	34 Se 78.96 Selenium	35 Br 79.909 Bromine	36 Kr 83.80 Krypton
5	37 Rb 85.47 Rubidium	38 Sr 87.62 Strontium	39 Y 88.91 Yttrium	40 Zr 91.22 Zirconium	41 Nb 92.91 Niobium	42 Mo 95.94 Molybdenum	43 Tc (99) Technetium	44 Ru 101.1 Ruthenium	45 Rh 102.90 Rhodium	46 Pd 106.4 Palladium	47 Ag 107.870 Silver	48 Cd 112.40 Cadmium	49 In 114.82 Indium	50 Sn 118.69 Tin	51 Sb 121.75 Antimony	52 Te 127.60 Tellurium	53 I 126.90 Iodine	54 Xe 131.30 Xenon
6	55 Cs 132.91 Cesium	56 Ba 137.34 Barium	57 TO 71	72 Hf 178.49 Hafnium	73 Ta 180.95 Tantalum	74 W 183.85 Tungsten	75 Re 186.2 Rhenium	76 Os 190.2 Osmium	77 Ir 192.2 Iridium	78 Pt 195.09 Platinum	79 Au 197.0 Gold	80 Hg 200.59 Mercury	81 Tl 204.37 Thallium	82 Pb 207.19 Lead	83 Bi 208.98 Bismuth	84 Po (210) Polonium	85 At (210) Astatine	86 Rn (222) Radon
7	87 Fr (223) Francium	88 Ra 226.05 Radium	89 TO 103															

Series															
Lanthanide series سلسلة اللانثانيدات	57 La 138.91 Lanthanum	58 Ce 140.12 Cerium	59 Pr 140.91 Praseodymium	60 Nd 144.24 Neodymium	61 Pm (147) Promethium	62 Sm 150.35 Samarium	63 Eu 151.96 Europium	64 Gd 157.25 Gadolinium	65 Tb 158.92 Terbium	66 Dy 162.50 Dysprosium	67 Ho 164.93 Holmium	68 Er 167.26 Erbium	69 Tm 168.93 Thulium	70 Yb 173.04 Ytterbium	71 Lu 174.97 Lutetium
Actinide series سلسلة الأكتينيدات	89 Ac (227) Actinium	90 Th 232.04 Thorium	91 Pa (231) Protactinium	92 U 238.03 Uranium	93 Np (237) Neptunium	94 Pu (242) Plutonium	95 Am (243) Americium	96 Cm (247) Curium	97 Bk (249) Berkelium	98 Cf (251) Californium	99 Es (254) Einsteinium	100 Fm (253) Fermium	101 Md (256) Mendelevium	102 No (254) Nobelium	103 Lw (257) Lawrencium

شكل (**5.2**): الجدول الدورى للعناصر الكيميائية . تترتب العناصر الكيميائية فى صفوف أفقية طبقا للعدد الذرى ، كما تترتب فى أعمدة رأسية بحيث تكون كل العناصر فى العمود الرأسى لها العدد نفسه من الإلكترونات فى غلافها الخارجى ، ويكون لها بالتالى خصائص كيميائية متشابهة . وتسمى مجموعة العناصر التى لها الأعداد من 57 حتى 71 باللانثانيدات **lanthanids** أو العناصر الأرضية النادرة ، بينما تسمى مجموعة العناصر التى لها الأعداد 89 حتى 103 بالأكتينيدات **actinides** . وتتميز اللانثانيدات والأكتينيدات بأن لها نفس عدد الإلكترونات فى مداراتها الخارجية ، ولكن تختلف عن بعضها فى عدد الإلكترونات فى مداراتها الداخلية .

العناصر الأخرى: تتميز الأعمدة التى توجد أقصى يسار الجدول الدورى ، وتلك التى توجد أقصى يمينه بأن لها ميولا مختلفة نحو اكتساب أو فقد أو المشاركة فى الإلكترونات . فالعمود الموجود فى الناحية اليمنى والذى يبدأ بعنصر الكربون (C) يضم عنصر السيليكون (Si) وهو من أكثر العناصر شيوعاً على الأرض . ويميل كل من الكربون والسيليكون ، كما لاحظنا سابقا ، إلى المشاركة فى الإلكترونات . أما العناصر الموجودة فى العمود الأخير أقصى اليمين والذى يبدأ بعنصر الهيليوم (He) فإن أغلفتها الخارجية تكون مشبعة بالإلكترونات ولا تميل لاكتساب أو فقد إلكترونات . ولذلك فإن هذه العناصر على عكس بقية العناصر فى بقية الأعمدة لاتتفاعل كيميائيا مع العناصر الأخرى إلا تحت ظروف خاصة جدا .

IV الروابط الكيميائية

ترتبط أيونات وذرات العناصر التى تكوّن المركبات الكيميائية المختلفة بقوى كهربية تعمل على جذب الإلكترونات يطلق عليها الروابط الكيميائية chemical bonds . وقد يكون هذا التجاذب قويا أو ضعيفا نتيجة لاكتساب أو فقد الإلكترونات أو المساهمة فيها. وبالتالى ، تكون الروابط الناشئة عن هذا التجاذب قوية أو ضعيفة. وتعمل الروابط الكيميائية القوية على حفظ المادة من التحلل إلى عناصرها الأصلية أو إلى مركبات أخرى . وعلاوة على ذلك ، فإن هذه الروابط تجعل المعادن صلدة وتحافظ عليها من التكسر أو التفلق. وأكثر الروابط الكيميائية شيوعا فى المعادن المكوّنة للصخور الرابطتان الأيونية والتساهمية.

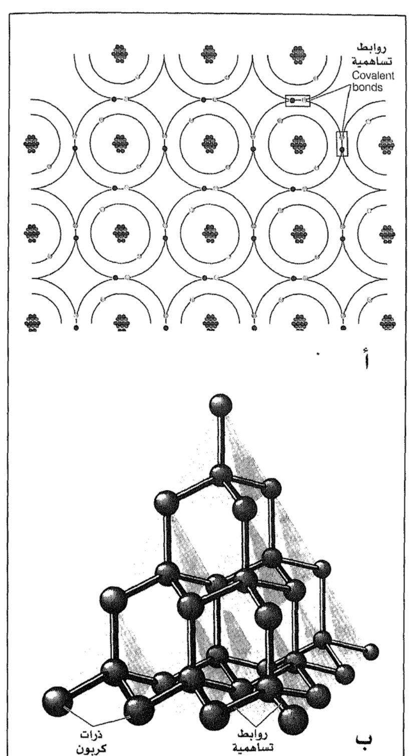
أ ـ الروابط الأيونية

الرابطة الأيونية ionic bond هى أبسط أنواع الروابط الكيميائية . وتنشأ هذه الرابطة نتيجة للتجاذب بين الأيونات المتضادة الشحنة مثل أيون الصوديوم الموجب (Na^+) وأيون الكلور السالب (Cl^-) فى كلوريد الصوديوم (شكل 3.2). وتقل قوة الرابطة الأيونية كثيرا كلما زادت المسافة بين الأيونات ، بينما تزداد قوة الرابطة بزيادة الشحنات الكهربية للأيونات. والروابط الأيونية هى أكثر أنواع الروابط الكيميائية شيوعا فى المعادن ، حيث إن نحو 90 ٪ من المعادن هى فى الأصل مركبات أيونية .

ب - الروابط التساهمية

تحدث **الروابط التساهمية covalent bonds** عندما تكوّن العناصر مركبات عن طريق التشارك فى بعض إلكترونات مداراتها الخارجية دون أن تفقد أو تكتسب إلكترونات . وبصفة عامة فإن الروابط التساهمية تكون أقوى من الروابط الأيونية . والتركيب البلورى لمعدن الماس الذى يتكون من عنصر الكربون فقط ، يتماسك عن طريق الروابط التساهمية. وكما رأينا سابقا فى معدن الماس، فإن ذرة الكربون يكون بها أربعة إلكترونات فى مدارها الخارجى ، ويحتاج إلى أربعة إلكترونات أخرى بالمشاركة حتى يصبح المدار الخارجى مشبعا بثمانية إلكترونات (شكل 6.2أ) . وتكون كل ذرة (وليس أيونا) فى معدن الماس محاطة بأربع ذرات أخرى مرتبة على هيئة شكل رباعى الأوجه

tetrahedron ، وهو هرم مكون من أربعة أوجه ، كل وجه عبارة عن مثلث متساوى الأضلاع (شكل 6.2 ب). وفى هذا الترتيب، فإن كل ذرة كربون تشارك بإلكترون مع كل من الذرات الأربعة المجاورة لها . وبذلك تصل إلى حالة الاستقرار، حيث يوجد فى غلافها الخارجى ثمانية إلكترونات. وقد تكون الروابط الكيميائية مرحلة وسطى بين الروابط الأيونية الصرفة والروابط التساهمية الصرفة ، لأن بعض الإلكترونات يتم تبادلها والبعض الآخر تتم المشاركة فيه .



شكل (6.2): الرابطة التساهمية covalent bond فى الماس

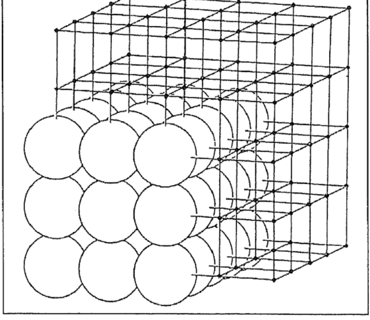
أ) رسم يوضح كيف تساهم كل ذرة كربون فى الماس بأربعة إلكترونات فى غلافها الخارجى مع أربع ذرات كربون أخرى بحيث يصبح الغلاف الخارجى فى كل الذرات مشبعا بثمانية إلكترونات .

ب) تكون كل ذرة كربون فى الماس محاطة بأربع ذرات أخرى مرتبة على هيئة شكل رباعى الأوجه.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

٧ـ التركيب الذرى للمعادن

تمثل المعادن تجمعا من الذرات مرتبة فى شبكة بلورية **crystal lattice** فى الأبعاد الثلاثة فى الفراغ ، ولا ترى حتى بالميكروسكوب العادى (شكل 7.2). وتساعد المناقشة السابقة عن الروابط الكيميائية بين الذرات والأيونات إلى فهم أوضح للأشكال المنتظمة التى تميز التركيب الذرى للمعادن، وكذلك للظروف التى تكونت فيها المعادن. وتسمى المواد الصلبة التى تتميز بالبنية البلورية crystal structure بالمواد الذرات مع بعضها البعض، حسب النسب الكيمائية الصحيحة والترتيب الذرى المنتظم (علينا أن نتذكر أن ذرات المعدن تكون مرتبه فى شبكة بلورية ثلاثية الأبعاد) . ويمثل ارتباط ذرات الكربون بعضها ببعض فى معدن الماس ـ وهو معدن يتكون بالرابطة التساهمية ـ أحد أمثلة التبلور والبناء البلورى . وأثناء نمو بلورة الماس ، فإن بناءها الذرى المكوّن من رباعيات أوجه من ذرات الكربون تمتد فى كافة الاتجاهات بإضافة ذرات جديدة باستمرار فى الترتيب الهندسى الصحيح (شكل



شكل (7.2): تتكون البلورات من ذرات مرتبة بانتظام فى الأبعاد الثلاثة . فإذا تخيلنا أنه يمكن ربط مراكز تلك الذرات بخيوط ، فإن البلورة تشبه فى هذه الحالة شبكة منتظمة فى الأبعاد الثلاثة تعرف بالشبكة البلورية (crystal lattice) .

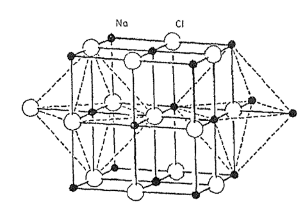
المتبلورة **crystalline materials** . وكما سيتضح فى هذا الفصل، فإن البنية البلورية للمعادن تعكس خواصها الطبيعية. هذا وسنناقش أولا طريقة تكوّن المعادن.

أ ـ طريقة تكوين المعادن

تتكون المعادن بالتبلور **crystallization** ، أى ينمو جزء صلب من مادة، بحيث تتجمع مكوناتها من

6.2) . ومن المعلوم أنه يمكن تصنيع الماس تحت ظروف ضغط عال جدا وحرارة شديدة ، والتى تحاكى الظروف فى وشاح الأرض.

وأيونات الصوديوم والكلور التى تكوّن كلوريد الصوديوم ـ وهو معدن يتكون بالرابطة الأيونية ـ يمكن أن تتبلور أيضا فى صفوف منتظمة فى الأبعاد الثلاثة . ويوضح شكل (8.2) الترتيب الهندسى



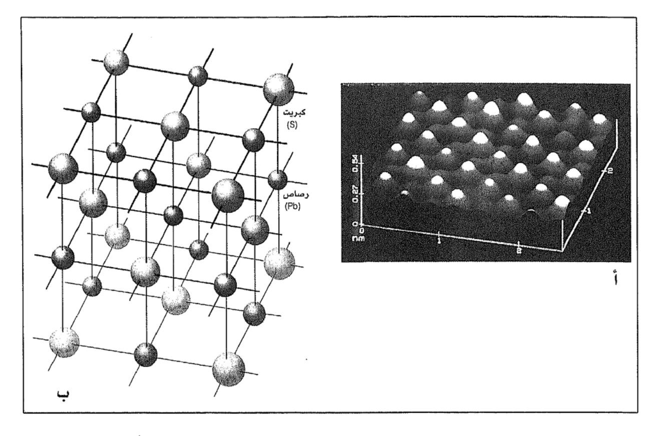
شكل (**8.2**): تركيب كلوريد الصوديوم ، حيث تمثل الخطوط المتقطعة ترتيب كل من أيونات الصوديوم والكلوريد فى شكل ثمانى الأوجه .

لأيونات كلوريد الصوديوم ، حيث يحاط كل أيون بستة أيونات من النوع الآخر فى سلسلة من ثمانيات الأوجه ممتدة فى الأبعاد الثلاثة. ويكون حجم الذرات والأيونات متناهيا فى الصغر، حيث يكون معظمها فى حدود عدة عشرات من المليون من السنتيمتر، بحيث لا نستطيع أن نرى الترتيب البلورى لمعدن ما حتى باستخدام الميكروسكوبات ذات قوة التكبير العالية. إلا إنه يمكننا الآن أن نصور الترتيب الذرى للبلورات باستخدام الميكروسكوب الإلكترونى ذى قوة التكبير العالية (شكل 9.2).

وتبدأ عملية التبلور عندما تنخفض درجة حرارة السائل إلى درجة أقل من درجة تجمد السائل freezing point . وفى حالة الماء فإن درجة الصفر هى الدرجة التى تبدأ تحتها بلورات الثلج (وهو معدن) فى التبلور. وبالمثل عندما تبرد الصهارة **magma** وهى مادة صخرية منصهرة (ساخنة وسائلة) ، تبدأ المعادن الصلبة فى التبلور منها . فعندما تنخفض درجة حرارة الصهارة تحت درجة الانصهار melting point، والتى قد تكون أعلى من 1000°م ، فإن بلورات المعادن السيليكاتية مثل الأوليفين أو الفلسبار تبدأ فى التكوّن .

كما أن هناك مجموعة من الظروف التى تؤدى إلى تبلور المعادن أثناء عملية الترسيب ، حينما تبدأ السوائل فى التبخر من المحاليل . ويتكون المحلول عندما تذاب مادة كيميائية فى مادة أخرى ، مثل الملح فى الماء. وعندما يبدأ الماء فى التبخر من محلول الملح ، فإن تركيز الملح يتزايد حتى يصبح المحلول مشبعا بالملح - أى لا يستطيع أن يحتفظ بمزيد من الملح. فإذا استمر البخر، فإن الملح يبدأ فى الترسيب ؛ بمعنى أن ينفصل عن المحلول مكونا بلورات .

وتبدأ عملية التبلور بتكوين بلورات**crystals** منفردة ميكروسكوبية الحجم . والبلورات أجسام تحدها أسطح مستوية تكونت بفعل الطبيعة (أى ليست صناعية) تعرف بأوجه البلورة crystal faces. والوجه البلورى فى المعدن هو انعكاس وتعبير خارجى عن البناء الذرى الداخلى للمعدن . وتنمو البلورات الميكروسكوبية أثناء عملية التبلور ، وتكون محتفظة بالأوجه البلورية المميزة لها ، طالما أنه يمكنها النمو بحرية دون عوائق. وتتكون البلورات الكبيرة الحجم ، ذات الأوجه البلورية المحددة عندما يكون النمو بطيئا وبهدوء، وتتواجد فى حيز يسمح لها بالنمو دون تداخل مع البلورات الأخرى القريبة منها (شكل 10.2 أ). ولهذا السبب ، فإن معظم البلورات الكبيرة الحجم (شكل 10.2 ب) تتكون فى الفراغات الواسعة فى ثنايا الصخور ، مثل الكسور المفتوحة أو الكهوف .



شكل (9.2): رؤية الذرات فى المعادن ، ترتيب ذرات الرصاص (Pb) والكبريت (S) فى معدن الجالينا PbS وهو أكثر معادن الرصاص انتشارا . تكون الرابطة بين الرصاص والكبريت أيونية ، حيث يكوّن الرصاص كاتيون رصاص (Pb^{2+}) ، بينما يكوّن الكبريت أنيون كبريت (S^{2-}) ، ولتتعادل الشحنات فلابد من وجود عدد من ذرات الرصاص مساو لعدد ذرات الكبريت . وتكون الذرات صغيرة الحجم لدرجة أن مكعبا من الجالينا يبلغ طول حرفه 1 سم يحتوى على 10^{22} ذرة من كل من الرصاص والكبريت .

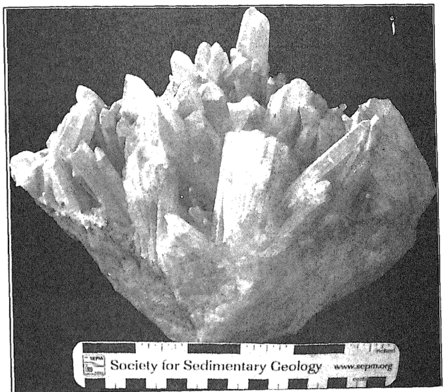
أ) الذرات على سطح بلورة الجالينا كما ترى بالميكروسكوب الإلكترونى ، وتبدو ذرات الكبريت أكبر حجما من ذرات الرصاص .

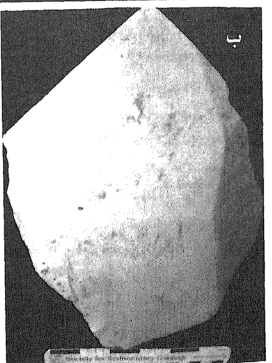
ب) طريقة تعبئة الذرات فى بلورة الجالينا .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وفى الغالب ، فإن الفراغات بين البلورات النامية تكون ممتلئة أو أن عملية التبلور تتم بسرعة ، ولذلك تنمو أوجه البلورة حينئذٍ وتتداخل مع بعضها البعض وتلتحم البلورات سابقة التكوين لتكوّن كتلة صلبة من الجسيمات المتبلورة . وفى هذه الكتلة المتبلورة ، فإن عدداً قليلاً من الحبيبات يمكن أن تكوّن بعض الأوجه ، أو قد تكون الحبيبات المتبلورة عديمة الأوجه تماما .

أما المواد غير المتبلورة **amorphous materials** (مشتقة من اليونانية بمعنى دون شكل) والتى تعرف أيضا بالمواد الزجاجية glassy materials فهى المواد التى تتصلب بسرعة من





شكل (**10.2**) : نماذج لنمو بلورات كوارتز كبيرة الحجم .

(أ) بلورات كوارتز كبيرة الحجم ذات أوجه بلورية محددة تدل على التبلور والنمو ببطء وبهدوء فى حيز يسمح لها بالنمو : وادى جـرف ، الصحراء الشرقية – مصر . (مجموعة أ.د. محمود فوزى الرملى متحف الجيولوجيا – جامعة الأزهر) .

(ب) بلورة كوارتز كبيرة الحجم تكونت فى فراغ واسع ، الصحراء الشرقية - مصر .

(مجموعة أ.د. يوسف الششتاوى ، متحف قسم الجيولوجيا – جامعة الأزهر) .

السوائل (الصخور المنصهرة) بحيث لا يكون بها أى نظام تبلور داخلى . وعلى العكس ، فإنها توجد على هيئة كتل لها أسطح غير مستوية ذات مكسر محارى (أسطح مستوية ومنحنية). ومعظم الزجاج الشائع هو زجاج بركانى تكوّن أثناء النشاط البركانى.

ب. الإحلال الأيونى

يوضح شكل (8.2) الأحجام النسبية للأيونات فى كلوريد الصوديوم NaCl ، ويتضح منه أنه توجد ستة أيونات متجاورة فى الوحدة البنائية الأساسية لكلوريد الصوديوم NaCl . وتسمح الأحجام النسبية لأيونات الصوديوم والكلوريد أن تتراص فى ترتيب متقارب .

Ionic charge الشحنة الايونية		
	انيونات (سالبة)	كاتيونات (موجبة)
	S^{2-} 0.184, Cl^{1-} 0.181	
	O^{2-} 0.132, F^{1-} 0.136	K^{1+} 0.133, Pb^{2+} 0.120
القطر الايونى (nm)		Na^{1+} 0.097, Ca^{2+} 0.099
		Fe^{2+} 0.074
		Li^{1+} 0.060, Mg^{2+} 0.066, Fe^{3+} 0.064
		Al^{3+} 0.050, Si^{4+} 0.042
	0 0.2 0.4 nm	

شكل (11.2): الأحجام المختلفة للأيونات

تتراوح أقطار بعض الأيونات المهمة بين السيليكون Si^{4+} عند يمين الصف السفلى والكبريت S^{2-} عند يسار الصف العلوى . ويلاحظ أن أقطار الأنيونات تميل لأن تكون أكبر من الكاتيونات ، كما تكون أحجام الأيونات فى كل زوج من Si^{4+}، Al^{3+} و Mg^{2+}، Fe^{2+} و Na^{1+}، Ca^{2+} متقاربة وتحل محل بعضها بعضا فى البنية البلورية . أقطار الأيونات مقاسة بالنانومتر (nm) .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

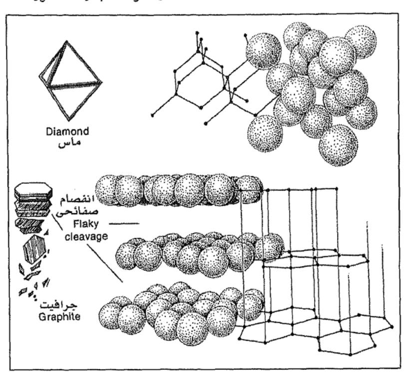
ويتناسـب حجـم الأيـون مـع التركيـب الـذرى للعناصر (شكل 11.2) . ويزداد حجـم الأيونـات مع زيادة عـدد الإلكترونـات وأغلفة الإلكترونـات . كـما تؤثر شحنة الأيون على حجمـه أيـضا. وكلـما زاد عـدد الإلكترونات التـى يفقـدها العنـصر ليـصبح كـاتيون ، زادت شحنته الموجبة وزادت قوة الجذب الكهربى بـين نواتـه وبـين الإلكترونـات المتبقيـة . وتكـون معظـم كاتيونات المعادن الشائعة صـغيرة نـسبيا ، بينـما تكـون معظم الأنيونات كبيرة، ومثال ذلك أنيون الأكسيجين ، وهـو الأكثـر انتـشارا فى الأرض . وبـما أن الأنيونـات تكون أكبر من الكاتيونات ، فإن معظـم فـراغ البلـورة تشغله الأنيونات ، بينما تتوزع الكاتيونات فى الفراغات الموجودة بينها . ونتيجة لذلك ، تتحدد البنيات البلورية اعتمادا على الطريقة التى تترتب بها الأنيونات ، وطريقة وضع الكاتيونات بينها .

الإحـلال الكـاتيونى: بنيـة بلوريـة واحـدة وتراكيـب كيميائية مختلفة

تستطيع الكاتيونات المتماثلة فى الحجم والـشحنة أن تحل محل بعضها البعض ، وأن تكوّن مركبات لها البنيـة البلوريـة نفـسها ، ولكـن بتركيـب كيميـائى مختلـف . ويشيع **الإحـلال الأيـونى ionic substitution** فى المعادن السيليكاتية ، والتى تتحد فيها الكاتيونـات مـع أيون السيليكات $(SiO_4)^{4-}$. ويوضح معدن الأوليفـين هذه العملية ، وهو معدن شائع فى الصخور البركانيـة . فأيونــات الحديــد (Fe) والماغنــسيوم (Mg) تكــون متشابهة فى الحجم ويحملان شحنتين موجبتين ، ولذلك فهما يحلان محل بعضهما بعضا بسهولة فى البنية البلوريـة لمعـادن الأوليفـين . فتركيـب الأوليفـين الماغنيـسيومى النقى Mg_2SiO_4 يعرف بالفورشتريت بينمـا الأوليفين الحديدى النقى Fe_2SiO_4 يعرف بالفايالايت . ويمكن توضيح تركيب معدن الأوليفين المحتوى على كـل مـن الحديد والماغنـسيوم بالـصيغة التاليـة $(MgFe)_2SiO_4$ والتــى تعنــى ببــساطة أن عــدد كاتيونـــات الحديــد والماغنسيوم يمكن أن تتغير ، إلا أن مجموعهما (والمـشار إليـه بالعـدد الـسفلى 2) لا يتغـير بالنـسبة لكـل أيـون سـيليكات $(SiO_4)^{4-}$. وتتحـــدد نـــسبة الحديـــد إلى الماغنـسيوم بنـاءً عـلى التواجـد النـسبى للعنـصرين فى الصهارة التى يتبلور منها معـدن الأوليفـين . وفى كثـير مــن معــادن الــسيليكات يحـل الألومنيـوم (Al) محـل الـــسيليكون (Si) حيـــث إن أيـــونى الألومنيـــوم والـــسيليكون متـــشابهان فى الحجـــم، بحيـــث يحـــل الألومنيـوم محـل الـسيليكون فى عديـد مـن البنيـات البلوريـــة . ويـــتم معادلـــة الفـــرق فى الـــشحنات بـــين الألومنيوم (3+) والسيليكون (4+) عـن طريـق زيـادة أحد الكاتيونـات الأخـرى ، مثـل كـاتيون الـصوديوم (1+).

2. التعـدد الـشكلى: بنيـات بلوريـة مختلفـة وتركيـب كيميائى واحد

من المعروف أن لكل معدن بنية بلورية داخلية مميزة. إلا أنه قد تكون للمادة الكيميائية الواحدة أكثر من بنيـة بلوريـة ، وبالتـالى أكثـر مـن نـوع مـن المعـادن للـمادة



شكل (**12.2**): ظاهرة التعدد الشكلى **polymorphism** . يتميز معدنا الماس والجرافيت بظاهرة التعدد الشكلى ، حيث إنهما يتكونان من عنصر الكربون ولهما بنية مختلفة تماما ؛ فالروابط الكيميائية فى الماس فى الأبعاد الثلاثة تجعل هذا المعدن صلدا للغاية ومتينا ، بينما تكون الروابط الكيميائية الأساسية فى معدن الجرافيت فى بعدين اثنين فقط مما يجعل المعدن صفائحيا ولينا .
(After Gilluly, J., Waters, A.C. and Woodford, A.O., 1975: Principles of Geology. 4th ed., W.H.Freeman and Company).

الكيميائية نفسها . ويطلق على هذه البنيات البلورية المختلفة للتركيب الكيميائى نفسه اسم **متعددة الشكل polymorphs** . ويعتمد تكون البنية البلورية على الظروف المحيطة بالمادة أثناء تبلورها من الضغط ودرجة الحرارة، وبالتالى على العمق الذى توجد عنده المادة أثناء تبلورها تحت سطح الأرض. فالماس والجرافيت (المادة المستخدمة فى أقلام الرصاص) معدنان يتميزان بظاهرة **التعدد الشكلى polymorphism** ، حيث إنهما يتكونان من عنصر الكربون، ولهما بنية بلورية مختلفة ومظهر مختلف تماما (شكل 12.2) . فالماس يتبلور فى فصيلة المكعب بينما يتبلور الجرافيت فى فصيلة السداسى. وتدل التجارب والمشاهدات الجيولوجية أن الماس يتكون ويبقى مستقرا عند درجات الحرارة والضغوط العالية للغاية الموجودة فى الوشاح. حيث يجبر الضغط العالى فى الوشاح ذرات الماس على أن تكون متقاربة التعبئة . وبالتالى فإن للماس كثافة عالية جدا وتبلغ 3.5 جم/ سم^3 ، وهى بالطبع أكبر من تلك التى تميز الجرافيت والتى تبلغ 2.1 جم/ سم^3. ويتكون الجرافيت ويبقى مستقرا عند درجات حرارة وضغط متوسط ، مثل ذلك الذى يوجد فى القشرة الأرضية . ويوضح جدول (1.2) بعض المعادن المتعددة الشكل الشائعة .

VI ـ المعادن المكوّنة للصخور

صُنفت المعادن طبقاً لتركيبها الكيميائى إلى ثمانى مجموعات . فبعض المعادن مثل النحاس تتواجد فى الطبيعة كعناصر نقية غير متأينة، تعرف بالمعادن العنصرية native elements . أما معظم المعادن فإنها تصنف تبعا لنوع الأنيون المكوّن لها . فالأوليفين يصنف كسيليكات طبقاً لأنيون السيليكات $(SiO_4)^{4-}$.

جدول (1.2) خواص بعض المعادن الشائعة متعددة الشكل

اسم المعدن	الفصيلة البلورية	التركيب
جرافيت	السداسى	C
الماس	المكعب	
كالسيت	الثلاثى	$CaCO_3$
أراجونيت	المعينى القائم	
بيريت	المكعب	FeS_2
ماركزيت	المعينى القائم	
كوارتز	الثلاثى	SiO_2
كريستوباليت	الرباعى	
تريديميت	المعنى القائم	
أرثوكليز	الميل الواحد	$KAlSi_3O_8$
الميكروكلين	الميول الثلاثة	
سانيدين	الميل الواحد	

ويصنف معدن الهاليت NaCl والسيلفيت KCl كهاليدات طبقا لأنيون الكلوريد Cl^-، والكالسيت طبقا لأنيون الكربونات $(CO_3)^{2-}$.

ولقد تمكن العلماء من تعريف حوالى 3500 معدن حتى الآن. وتوجد معظم هذه المعادن فى القشرة الأرضية، بالإضافة إلى عدد قليل من المعادن التى أمكن تعرفها فى صخور النيازك. كما أمكن اكتشاف معدنين جديدين فى صخور القمر.

وعلى الرغم من هذا العدد الكبير من المعادن، فإن الشائع منها فقط حوالى 30 معدنا تمثل الوحدات البنائية لمعظم صخور القشرة الأرضية، ولذلك فإنها تسمى المعادن المكوّنة للصخور rock-forming minerals. وهذه تتواجد بوفرة فى القشرة الأرضية. حيث يتكون نحو 99٪ من القشرة الأرضية من اثنى عشر عنصرا فقط بكميات تزيد نحو 0.1 ٪. وتعرف تلك العناصر بالعناصر الرئيسية **major elements** (جدول 2.2). وهكذا تتكون القشرة الأرضية من عدد محدود من المعادن، التى تتكون من واحد أو أكثر من تلك العناصر الاثنى عشر الشائعة.

ولا تتواجد العناصر الشحيحة **trace elements** وهى العناصر التى تتواجد بكميات أقل من 0.1 فى القشرة الأرضية كمعادن مستقلة، وإنها تميل إلى أن تتواجد فى المعادن المكونة للقشرة الأرضية بالإحلال الأيونى. فعلى سبيل المثال، يحتوى معدن الأوليفين $(Mg,Fe)_2\ SiO_4$ بالإضافة إلى عناصر الماغنسيوم والحديد والسيليكون والأكسيجين، وهى العناصر الرئيسية فى ذلك المعدن، على كميات قليلة من النحاس والنيكل والكادميوم والمنجنيز، بالإضافة لعديد من العناصر الأخرى نتيجة الإحلال الأيونى للماغنسيوم والحديد. ونناقش فيما يلى أكثر المعادن المكوّنة للصخور شيوعاً:

جدول (2.2) العناصر الأكثر انتشارا فى القشرة الأرضية

العنصر	النسبة المئوية بالوزن
الأكسيجين (O)	45.2
السيلكون (Si)	27.2
الألومنيوم (Al)	8.0
الحديد (Fe)	5.8
الكالسيوم (Ca)	5.06
الماغنسيوم (Mg)	2.77
الصوديوم (Na)	2.32
البوتاسيوم (K)	1.68
التيتانيوم (Ti)	0.86
الهيدروجين (H)	0.14
المنجنيز (Mn)	0.10
الفوسفور (P)	0.10
كل العناصر الأخرى	0.77
المجموع	100.00

أ - السيليكات **silicates** وهى أكثر المعادن شيوعا فى القشرة الأرضية ، وتتكون من الأكسيجين (O) والسيليكون (Si) ، وهما أكثر العناصر انتشارا فى القشرة الأرضية ـ وتكون متحدة مع كاتيونات عناصر أخرى .

ب - الكربونات **carbonates** وهى معادن مكوّنة من الكربون والأكسجين فى هيئة أيون الكربونات $(CO_3)^{2-}$ متحدا مع الكالسيوم والماغنسيوم مثل معدن الكالسيت $CaCO_3$.

ج - الأكاسيد**oxides** وهى مجموعة من مركبات الأكسيجين والكاتيونات الفلزية مثل معدن الهيماتيت Fe_2O_3 .

د - الكبريتيدات **sulfides** وهى مركبات لأنيون الكبريتيد S^{2-} وكاتيونات فلزية ، مثل معدن البيريت FeS_2 .

هـ - الكبريتات **sulfates** وهى مركبات لأنيون الكبريتات $(SO_4)^{-}$ وكاتيونات فلزية ، وتضم معدن الأنهيدريت $CaSO_4$.

أما باقى المجموعات الكيميائية من المعادن ، والتى تشمل المعادن العنصرية والهاليدات والفوسفات ، فإنها لا تتواجد بدرجة تواجد المعادن المكوّنة للصخور. ونتناول هنا بشىء من التفصيل كل من هذه المجموعات :

أ ـ السيليكات

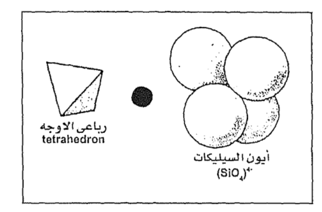
يعتبر أيون السيليكات $(SiO_4)^{4-}$ هو الوحدة الأساسية المكوّنة لبنية كل معادن السيليكات. ويتكون أيون السيليكات من أربعة أيونات أكسيجين(O^{2-}) تتشارك فى الإلكترونات مع أيون السيليكون (Si^{4+}) الأصغر حجما ، والذى يقع فى الفراغ بين أيونات الأكسيجين (شكل 13.2) .

ويؤدى هذا الترتيب لتكوين شكل هرمى مكوّن من أربعة أوجه ، لتكوّن ما يسمى برباعى الأوجه tetrahedron ، وكل وجه فى هذا الشكل الهرمى يتكون من مثلث متساوى الأضلاع (شكل 13.2) . ويكون كل ركن من أركان رباعى الأوجه مركزا لذرة أكسيجين . ورباعى الأوجه للسيليكون والأكسيجين عبارة عن أنيون يحمل أربع شحنات سالبة تتعادل

بأربع شحنات موجبة . وليتكوّن معدن متعادل كهربيا، فإن هذا التعادل يتم بطريقتين :

- ارتباط الأيون مع كاتيونات مثل : الصوديوم (Na^+) والبوتاسيوم (K^+) والكالسيوم (Ca^{2+})، والماغنسيوم (Mg^{2+}) والحديد (Fe^{2+}) .
- مشاركة أيون الأكسيجين من رباعيات الأوجه للسيليكون والأكسيجين مع رباعيات الأوجه الأخرى.

تكون 1:3 . أما فى السيليكات الهيكلية (الإطارية) فإن هذه النسبة تكون 1:2 . وبالتالى ، فكلما زاد عدد ذرات الأكسيجين زادت نسبة السيليكون فى التركيب. ولذلك توصف معادن السيليكات بأنها عالية أو منخفضة فى محتوى السيليكا اعتمادا على نسبة الأكسيجين إلى السيليكون. وفيما يلى وصف مختصر لكل من هذه الأنواع من رباعيات الأوجه:



شكل (13.2): رباعى الأوجه tetrahedron وأيون السيليكات $(SiO_4)^{4-}$: يتكون أيون السيليكات من أربعة أيونات أكسيجين O^{2-} وأيون سيليكون Si^{4+} أصغر حجما يتواجد فى الفراغ بين أيونات الأكسيجين . تعبر النقطة السوداء عن ذرة السيليكون مقارنة مع ذرات الأكسيجين الأكبر حجما .
(After Hatch, F.H., Wells, A.K. and Wells, M.K., 1972: Petrology of the Igneous Rocks. 13th edition. Thomas Murby & Co., London)

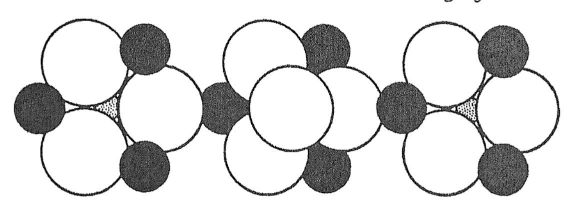
وتتكون كل معادن السيليكات من رباعيات الأوجه للسيليكون والأكسيجين كوحدات أساسية مرتبطة بالطريقتين السابقتين. وقد تكون رباعيات الأوجه مفردة أو مرتبطة فى حلقات أو فى سلاسل مفردة أو فى سلاسل مزدوجة أو فى هيئة صفائح أو على هيئة سيليكات هيكلية (إطارية) ، كما هو موضح فى شكلى (14.2 و17.2) . وجدير بالذكر أن نسبة ذرات الأكسيجين إلى ذرات السيليكون تختلف فى بنيات السيليكات المختلفة . ففى رباعيات الأوجه المفردة توجد 4 ذرات أكسيجين لكل ذرة سيليكون. أما فى السلسلة المفردة فإن نسبة الأكسيجين إلى السيليكون

رباعيات الأوجه المفردة: ترتبط رباعيات الأوجه المفردة isolated tetrahedra بالكاتيونات، حيث يرتبط كل أيون أكسيجين فى رباعى الأوجه بكاتيون (شكل 15.2). وترتبط الكاتيونات بدورها بأيونات الأكسيجين فى رباعيات الأوجه الأخرى. وهكذا تعزل الكاتيونات رباعيات الأوجه عن بعضها البعض من كل الجهات. والأوليفين هو أحد المعادن المكوّنة للصخور والمكوّنة من رباعيات الأوجه المفردة.

ويتكون الأوليفين عند درجات حرارة عالية، ويكون لونه أسود إلى أخضر زيتونى ، وله بريق زجاجى ومكسر محارى . ويتكون من بلورات صغيرة

شكل (14.2) : بنيات السيليكات الرئيسية

ترتيب رباعيات الأوجه	المعدن المثال	التركيب الكيميائى
رباعيات الأوجه المفردة Isolated tetrahedron : لايشارك الأكسيجين بين رباعيات الأوجه، وترتبط رباعيات الأوجه المنعزلة بكاتيونات ترتبط بأيونات الأكسيجين فى رباعيات الأوجه	الأوليفين	سيليكات الماغنسيوم – الحديد $(Mg, Fe)_2SiO_4$
حلقات من رباعيات الأوجه Rings of tetrahedra: ترتبط أيونات الأكسيجين فى كل رباعى أوجه مع رباعيات الأوجه المجاورة لها مكوّنة حلقات من ثلاث أو أربع أو ست رباعيات أوجه مغلقة	الكورديريت	سيليكات الماغنسيوم-الحديد-الألومنيوم $Al_3(Mg, Fe)_2Si_5AlO_{18}$
سلاسل مفردة Single chains : يرتبط كل رباعى أوجه مع اثنين آخرين عن طريق مشاركة الأكسيجين ، وترتبط السلاسل المفردة مع السلاسل المجاورة بواسطة الكاتيونات .	البيروكسين (انستاتيت)	سيليكات الماغنسيوم – الحديد $(Fe, Mg)SiO_3$
سلاسل مزدوجة Double chains : ترتبط سلسلتان متوازيتان من سلاسل البيروكسين بالتشارك فى أيونات الأكسيجين ، وتربط الكاتيونات السلاسل المزدوجة المتجاورة معا.	الأمفيبول (هورنبلند)	سيليكات الكالسيوم – الماغنسيوم – الحديد $Ca(Mg,Fe)_4Al(Si_7Al)O_{22}(OH,F)$
صفائح Sheets: يرتبط كل رباعى أوجه مع ثلاث رباعيات أوجه مجاورة عن طريق مشاركة الأكسيجين ، وترتبط الصفائح بالكاتيونات .	كاولينيت ، ميكا (مسكوفيت)	سيليكات ألومنيوم $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ سيليكات البوتاسيوم- الألومنيوم $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
ترابط إطارى Frameworks: تشارك جميع أيونات الأكسجين فى كل رباعى أوجه مع رباعيات أوجه أخرى لتكوّن بناءً هيكليا يمتد فى الأبعاد الثلاثة.	الفلسبارات (أورثوكليز) الكوارتز	سيليكات البوتاسيوم- الألومنيوم $KAlSi_3O_8$ أكسيد سيليكون SiO_2



شكل (**15.2**): التركيب الذرى للأوليفين . ويوضح الشكل رباعيات الأوجه والكاتيونات المصاحبة لأيونات الحديد والماغنسيوم موضحة باللون الأسود ، بينما أيونات السيلكون موضحة بالنقط .
(After Hatch, F.H., Wells, A.K. and Wells, M.K., 1972: Petrology of the Igneous Rocks. 13th edition. Thomas Murby & Co., London)

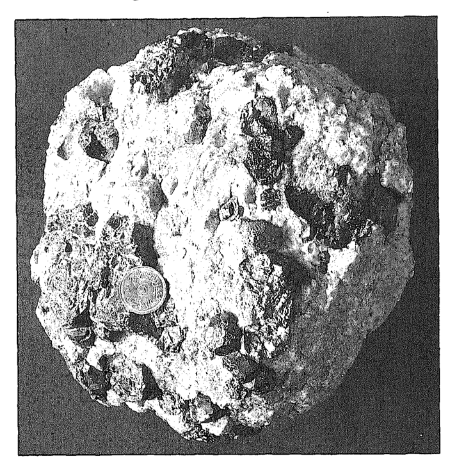
حبيبية المظهر عادة . ويتكون الأوليفين من مجموعة من المعادن ، ولذا فإنه يقدم نموذجا بسيطا على الطريقة التى يتغير فيها التركيب بين طرفى سلسلة متصلة . وكما ذكرنا سابقا ، فإننا نستخدم مصطلح مجموعة معدنية mineral group لوصف المعدن الذى يحدث فيه إحلال كاتيونى دون تغير فى نسبة الكاتيونات إلى الأنيونات . ويمثل معدنا الفورشتريت Mg_2SiO_4 والفيالايت Fe_2SiO_4 طرفى السلسلة ، حيث يحدث إحلال للحديد Fe^{2+} أو الماغنسيوم Mg^{2+} محل بعضهما فى البنية البلورية للمعدن، وتتغير نسبة الحديد إلى الماغنسيوم نتيجة لذلك من 100 إلى صفر ومن صفر إلى 100 ، وتتكون نتيجة لذلك مجموعة معادن الأوليفين olivine group.

ومن المجموعات المعدنية المهمة التى تتميز باحتوائها على رباعيات الأوجه السيليكاتية المفردة مجموعة معادن الجارنت ، والتى يؤدى الإحلال الكاتيونى فيها إلى تكوين مركبات أكثر تنوعا من تلك التى شاهدناها فى مجموعة الأوليفين . والصيغة العامة لهذه المجموعة هى $A_3B_2\ (SiO_4)_3$ ، حيث يرمز الحرف (A) للكاتيونات ثنائية التكافؤ مثل : الماغنسيوم (Mg^{2+}) أو الحديدوز (Fe^{2+}) أو الكالسيوم (Ca^{2+}) أو المنجنيز (Mn^{2+}) أو أى خليط من تلك الكاتيونات. بينما يرمز الحرف (B) للكاتيونات ثلاثية التكافؤ مثل : الألومنيوم (Al^{3+}) أو الحديديك (Fe^{3+}) أو الكروم (Cr^{3+}) أو خليط منها. ويوجد الجارنت فى الصخور المتحولة الموجودة فى القشرة القارية ، كما قد توجد بلورات كبيرة وجميلة منه فى صخور الجرانيت أحيانا (شكل 16.2) . ويتميز الجارنت كذلك بصلادته العالية ، ولذلك يستخدم فى أحجار الطحن والتلميع وأقراص تقطيع الصخور .

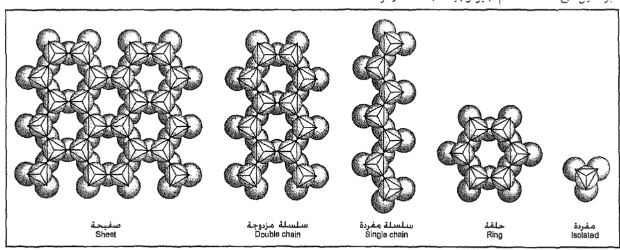
الترابط الحلقى: تتكون حلقات رباعيات الأوجه rings of tetrahedra عندما ترتبط أيونات الأكسيجين فى كل رباعى أوجه مع رباعيات الأوجه المجاورة لها مكوّنة حلقات مغلقة (شكل 17.2 ب) . حيث يشارك فى هذه الحلقات أيونى أكسيجين من كل

رباعى أوجه مع رباعيات الأوجه الأخرى (رباعى أوجه واحد على كل جانب) . وقد ترتبط فى هذه الحلقات ثلاثة أو أربعة أو ستة رباعيات أوجه مع بعضها البعض . ويتميز معدن الكورديريت الشائع فى الصخور المتحولة بهذه البنية البلورية .

ترابط السلاسل المفردة: تتكون السلاسل المفردة



شكل (**16.2**): بلورات جارنت كبيرة الحجم فى صخور الجرانيت بمنطقة وادى حوضين بجنوب الصحراء الشرقية بمصر . (أ.د. إبراهيم أبو الليل على ، متحف قسم الجيولوجيا – جامعة الأزهر).



شكل (**17.2**): البنيات البلورية لمعادن السيليكات ، والتى يمكن تصنيفها طبقا لطريقة ارتباط رباعيات الأوجه .

(After Press. F. and Siever. R.. 1998: Understanding Earth. 2nd edition. W. H. Freeman and Company.

single chains عــن طريــق المـشاركة فى أيونــات الأكسيجين. حيث يرتبط أيونان مـن الأكـسيجين مـن كل رباعى أوجه مع رباعيات الأوجه المجاورة لها ، فى هيئة سلاسـل مفتوحـة (شـكل 17.2جـ) . وتـرتبط السلاسل المفردة مع الـسلاسل الأخـرى المجـاورة لهـا بواسـطة الكاتيونــات. وتتكــون معــادن مجموعـــة البيروكسين pyroxene group بهذه الطريقة . فمثلا، يتكـون معـدن الإنـستاتيت (أحـد معـادن مجموعـة البيروكـسين) مـن أيونـات الحديـد أو الماغنـسيوم أو كليهما، والتى ترتبط معا فى سلسلة من رباعيات الأوجه يحل فيها الحديد والماغنسيوم محل بعضهما الـبعض، كـما هو الحال فى مجموعة معادن الأوليفين. ويعبر عـن بنيـة هـذا المعـدن بالـصيغة الكيميـائية $(MgFe)SiO_3$. ومن أشهر أمثلة معادن البيروكـسين معـدن الأوجيـت $Ca\ (MgFeAl)\ Si_2O_6$.

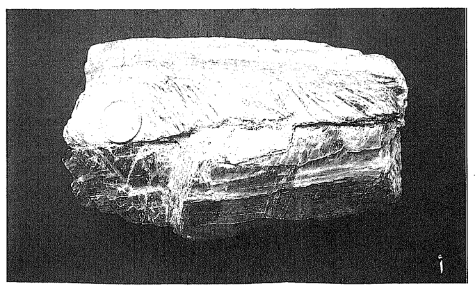
ترابط الـسلاسل المزدوجـة: قـد تـترابط سلـسلتان مفردتان من سلاسل البيروكسين ليكوّنا سلسلة واحدة مزدوجةdouble chain نتيجـة للتـشارك فى أيونـات الأكـسيجين ، (شـكل 17.2 د) . وتــرتبط الـسلاسل المزدوجة المتجاورة معا بواسـطة الكاتيونـات ، لتكـوّن مجموعــة معــادن الأمفيبــول amphibole group ، والتى تتميـز بوجـود مجموعـة الهيدروكـسيل (OH) . ومعدن الهورنبلند هو أحد معادن الأمفيبول الشائعة فى كل من الـصخور الناريـة والمتحولـة. وتركيـب معـدن الهورنبلند معقـد للغايـة ، حيـث يحتـوى عـلى أيونـات الكالــــــــسيوم (Ca^{2+}) والــــــــصوديوم (Na^{+}) والماغنسيوم(Mg^{2+}) والحديدوز (Fe^{2+}) والألومنيـوم (Al^{3})، ويكون لون معدن الهورنبلند أخـضر داكـن إلى أسود عادة . ويشبه معدن الهورنبلند معـدن الأوجيـت فى الـشكل ، إلا أن معــدن الهورنبلنـد يتميـز بتكــوين بلورات مستطيلة تتقاطع فيها مستويات الانفصام عنـد نحو 56° و124°، بينما تبدو بلورات معـدن الأوجيـت كتلية الشكل وتكون مستويات انفصام متعامدة تقريبـا على بعضها البعض .

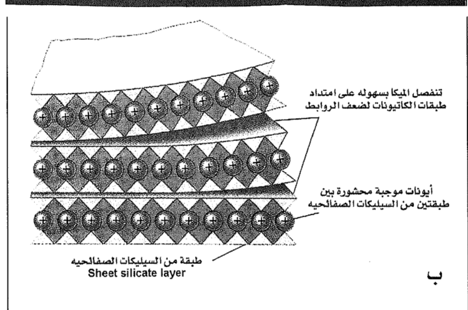
الترابط الصفائحى

تتكــون البنيــة الـصفائحية عنــدما تتــشارك ثلاثــة أيونات أكسيجين من كل ربــاعى أوجــه مــع رباعيــات الأوجه المجاورة لها لتتكون صـفائح متراصـة sheets من رباعيــات الأوجــه فــوق بعـضها الـبعض (شـكلى 17.2هــو 18.2 أ و ب) ، بيـنما تتواجـد الكاتيونــات كطبقة فاصلة بـين تلـك الـصفائح المتراصـة. ومعـادن مجموعة الميكا mica group ومجموعـة معـادن الطـين clay mineral group هى أكثر المعـادن الـسيليكاتية الصفائحية انتشارا. وتختلف مجموعة معادن الميكـا عـن مجموعات معادن السيليكات الـسابقة ، فى أن مجموعـة معادن الميكا تضم عناصر قلوية (بوتاسيوم أو صوديوم أو ليثيوم)، بالإضافة إلى عدم وجود عنصر الكالسيوم . ويتواجــد معــدن المــسكوفيت muscovite $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ فى عديـد مـن الـصخور، حيـث يمثل أحد أكثر معادن السيليكات الصفائحية انتـشاراً. ويمكن فصل المعدن فى صفائح رقيقة للغايـة وشـفافة. ومعدن البيوتيتbiotite هو أحد معادن الميكـا الغنيـة بالحديد ، حيث يتميز أيضا بمظهـره الأسـود اللامـع . وهى الصفة التى تميزه عن بقية المعادن الحديدومغنيسية الداكنة اللون. ومعدن البيوتيت مثل معـدن الهورنبلنـد

معدن شائع فى الصخور القارية مثل صخر الجرانيت النارى وصخر الشست المتحول .

وتتميز المعادن الطينية بتركيبها الصفائحى ، وتكون أكثر انتشارا فى حياتنا اليومية من بقية المعادن ، حيث تكوّن جزءاً رئيسيا من تركيب التربة. وتتكون المعادن الطينية عند سطح الأرض عندما يتفاعل الهواء والماء مع المعادن السيليكاتية المختلفة ، فتتكسر لتكوّن معادن الطين ومواد أخرى. وبلورات معادن الطين ميكروسكوبية ، ويتم تعرفها فقط باستخدام الميكروسكوب الإلكترونى. وتتميز معظم معادن الطين بوجود انفصام كامل موازٍ للصفائح (شكل 19.2) ، ويمكن تمييز أكثر من اثنى عشر نوعا من معادن الطين على أساس البنية البلورية والاختلاف فى التركيب الكيميائى . ويمثل معدن الكاولينيت

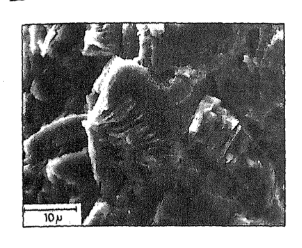




شكل (18.2): البنية الصفائحية للميكا

(أ) صفائح من الميكا تنفصل على امتداد أسطح الانفصام . من منطقة روض البرام ، الصحراء الشرقية – مصر . (مجموعة أ.د. محمود فوزى الرملى ، متحف قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر) .

(ب) علاقة التركيب البنائى للميكا بالانفصام cleavage ، حيث تتواجد الكاتيونات كطبقة فاصلة بين الصفائح المتراصة.



شكل (19.2): صورة باستخدام الميكروسكوب الإلكترونى الماسح (Scanning Electron Microscope (SEM توضح بلورات معدن الصلصال الدقيقة (كاولينيت kaolinite)، حيث يبدو الانفصام الكامل موازٍ للصفائح المكونة من السيليكات. الواحات الخارجة – الصحراء الغربية – مصر.

(After Abu-Zeid,M.M., 1982: Authigenic clay minerals in the Nubia Sandstone of Kharga Oasis (Western Desert, Egypt) as revealed by Scanning Electron Microscopy. Jb. Miner. Abh, 144, 2)

$Al_4Si_4O_{10}(OH_4)_8$ أحد معادن الطين الشائعة فى الرواسب، وهو مادة خام رئيسية فى صناعة الفخار والخزف والصينى.

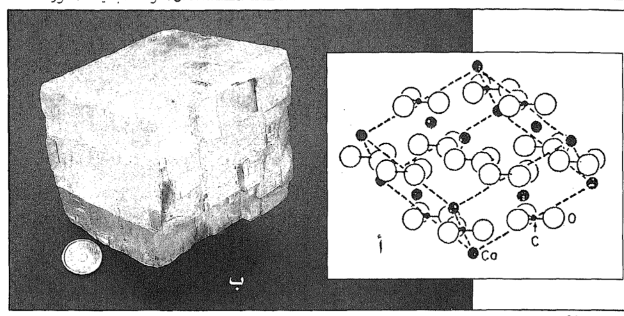
وتتكون معادن مجموعة السربنتين serpentine group من مادة ثلاثية التشكل trimorphous، لها تركيب كيميائى واحد $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_2$، ولكنها تكوّن ثلاثة معادن تختلف فى بنائها البلورى وشكلها البلورى، وهى معادن الكريزوتيل والأنتيجوريت والليزارديت، والتى توجد مع بعضها البعض ككتل خضراء دقيقة الحبيبات، وهى تتكون نتيجة تغير معادن الأوليفين أو أى معادن سيليكاتية أخرى. ويطلق على معدن الكريزوتيل، المكوّن من ألياف بيضاء، والاسم التجارى الأسبستوس.

الترابط أو التشابك الإطارى (الهيكلى)

يحدث الترابط أو التشابك الإطارى (الهيكلى) framework عندما تتشارك جميع أيونات الأكسيجين فى كل رباعيات الأوجه مع رباعيات أوجه أخرى لتكون بناءً هيكليا يمتد فى الأبعاد الثلاثة. ومن معادن السيليكات ذات البنية الإطارية (الهيكلية) مجموعتى معادن الفلسبار والسيليكا feldspar and silica groups، والتى تمثل أكثر المعادن شيوعا فى القشرة الأرضية، حيث يكوّن الفلسبار نحو 60٪ من كل معادن القشرة القارية، وهو يكوّن مع الكوارتز نحو 75٪ من حجم هذه القشرة. كما أن الفلسبار شائع أيضا فى صخور قيعان المحيطات.

والفلسبار له التركيب الإطارى (الهيكلى) نفسه للكوارتز، إلا أنه يختلف عنه فى أن الكوارتز يتكون من الأكسيجين والسيليكون فقط، بينما تحتوى رباعيات الأوجه السيليكاتية فى الفلسبار على Al^{3+} ليحل محل Si^{4+}، وتصبح الصيغة الكيميائية $(AlSi_3)O_8$. ويؤدى ذلك إلى وجود شحنة سالبة زائدة يتم معادلتها بإضافة أيون K^+ لتصبح الصيغة $KAlSi_3O_8$، وهو معدن الأرثوكليز أحد أهم معادن مجموعة الفلسبار. وفى معدن الألبيت $NaAlSi_3O_8$، وهو معدن مهم آخر، يعادل أيون الصوديوم الشحنة السالبة بدلا من أيون البوتاسيوم. أما المعدن المهم الثالث فى تلك المجموعة فهو معدن الأنورثيت، الذى يحتوى على الكالسيوم بدلا من البوتاسيوم أو الصوديوم. ونظرا لوجود شحنتين موجبتين على أيون الكالسيوم Ca^{2+}، فلابد أن يحدث تعديل، حيث يتم إدخال أيون ألومنيوم ثانى Al^3 بدلا من أيون سيليكون آخر Si^{4+} لتصبح الصيغة الكيميائية $CaAl_2Si_2O_8$ (معدن الأنورثيت).

وحيث إن ذرتى الصوديوم والكالسيوم متقاربتان فى نصف القطر، فإن أيون الكالسيوم Ca^{2+} يحل محل أيون الصوديوم Na^+ إحلالا كاملا فى البنية البلورية ليعطى عددا من المعادن ذات التركيب المتوسط بين



شكل (20.2): معدن الكالسيت

(أ) التركيب الذرى للكالسيت

(ب) اتجاهات الانفصام الثلاثة المميزة للكالسيت ، وادى أم بَرّور ، غرب جبل مويلحة – الصحراء الشرقية – مصر. (مجموعة أ.د. محمود فوزى الرملى ، متحف قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر) .

معدنى الألبيت والأنورثيت. وتعرف هذه السلسلة من المعادن بالبلاجيوكليز.

وتشمل مجموعة معادن السيليكا معدن الكوارتز SiO_2 ، وهو المعدن الشائع الوحيد المكون من الأكسيجين والسيليكون فقط. ويعتبر ثانى أكسيد السيليكون أبسط السيليكات من الوجهة الكيميائية، ويسمى أيضا سيليكا . ويكون معدن الكوارتز بلورات سداسية الجوانب لها ألوان جميلة ، وتنشأ الألوان من وجود كميات ضئيلة من الحديد أو الألومنيوم أو التيتانيوم أو أى عناصر أخرى تتواجد نتيجة الإحلال الأيونى . ويوجد الكوارتز فى الصخور النارية والمتحولة والرسوبية . والكوارتز أحد أكثر المعادن انتشارا كحجر كريم ومعدن زينة. كما توجد أنواع معينة من الكوارتز التى تتكون نتيجة الترسيب من محاليل ماء بارد وتكون دقيقة الحبيبات جدا لدرجة أنها تبدو عديمة التبلور. ولا يمكن تعرف البنية البلورية الداخلية التى تميز المعادن إلا باستخدام ميكروسكوبات ذات قوة تكبير عالية أو باستخدام الأشعة السينية أو وسائل بحث أخرى. وتعرف أشكال الكوارتز دقيقة الحبيبات بالكالسيدونى chalcedony. وتشمل أنواع الكالسيدونى نوعيات ملونة يستعمل بعضها كأحجار شبه كريمة مثل الأجيت ، وهو يتميز بوجود راقات ملونة، والفلنت وهو نوع صلد وكتلى ، والجاسبر وهو ذو لون أحمر متجانس.

ب ـ الكربونات

يعتبر معدن الكالسيت (كربونات الكالسيوم $CaCO_3$) من أكثر المعادن غير السيليكاتية شيوعا فى القشرة الأرضية (شكل 20.2 أ) ، كما يعتبر المكوّن الرئيسى فى مجموعة من الصخور يطلق عليها الصخور

الجيرية. والوحدة البنائية الأساسية فى هذا المعدن هى أيون الكربونات $(CO_3)^{2-}$ المكوّن من ذرة كربون محاطة بثلاث ذرات أكسيجين فى شكل مثلث. حيث يتشارك أيون الكربون مع أيونات الأكسيجين فى الإلكترونات. وتترتب مجموعات أيونات الكربونات فى صفائح مماثلة إلى حد ما للسيليكات الصفائحية . حيث ترتبط الصفائح مع بعضها البعض بطبقات من الكاتيونات (شكل 20.2 ب) . ففى معدن الكالسيت تفصل طبقات من أيونات الكالسيوم صفائح أيونات الكربونات. كما أن معدن الدولوميت وهو معدن شائع أيضا فى القشرة الأرضية ، تركيبه $CaMg\ (CO_3)_2$ ويتكون أيضا من نفس صفائح الكربونات المنفصلة عن بعضها بعضا بطبقات متبادلة من أيونات الكالسيوم وأيونات الماغنسيوم .

ج ـ الأكاسيد

تتكون معادن الأكاسيد من مركبات كيميائية يرتبط فيها الأكسيجين مع ذرات أو كاتيونات لعناصر أخرى، تكون عادة فلزية مثل الحديد (Fe^{2+} أو Fe^{3+}). وتترابط معظم معادن الأكاسيد أيونيا، حيث تتغير البنيات تبعا لحجم الكاتيونات الفلزية. وهذه المجموعة لها أهمية اقتصادية كبيرة ، حيث إنها تضم خامات معظم الفلزات، مثل الكروم والتيتانيوم ، المستخدمة فى صناعة المواد الفلزية، كما أن الهيماتيت Fe_2O_3 هو أحد خامات الحديد الأساسية .

ومن المعادن الشائعة الأخرى فى هذه المجموعة معدن السبينل ، وهو أكسيد يتكون من فلزى الماغنسيوم والألومنيوم $MgAl_2O_4$. ويتميز هذا المعدن بوجود بنية محكمة التعبئة فى صورة المكعب ، وله كثافة عالية تصل إلى 3.6 جم/ سم^3 ، مما يعكس ظروف تكوينه تحت ضغط مرتفع وحرارة عالية. والسبينل الشفاف من المعادن الكريمة التى تشبه الياقوت والسافير ، ويوجد ضمن مجوهرات التاج الإنجليزى والروسى .

د ـ الكبريتيدات

تضم مجموعة الكبريتيدات الخامات الرئيسية لمعظم المعادن ذات القيمة الاقتصادية مثل النحاس، والزنك والشكل . وتشمل هذه المجموعة مركبات لأيون الكبريتد S^{2-} مع كايتونات فلزية حيث تكتسب ذرة الكبريت فى أيون الكبريتيد إلكترونان من غلافها الخارجى. وتبدو معظم معادن الكبريتيدات مثل الفلزات، كما أن كلها تقريبا معتمة. وتختلف بنيات هذه المعادن نتيجة الطريقة التى تتحد بها أنيونات الكبريتد مع الكاتيونات الفلزية. ومعدن البيريت FeS_2 من أكثر معادن الكبريتيدات انتشارا ، والذى يطلق عليه كثيرا " ذهب المغفلين" بسبب بريقة الفلزى الأصفر.

هـ الكبريتات

يتواجد الكبريت فى الكبريتات على هيئة أيون الكبريتات، وهو عبارة عن شكل رباعى الأوجه مكوّن من ذرة كبريت واحدة فقدت 6 إلكترونات من مدارها الخارجى ومتحدة مع 4 أيونات أكسيجين(O^{2-}) لتعطى الصيغة SO_4^{2-} . وأيون الكبريتات هو القاعدة لبنيات عديدة. ومعدن الجبس هو أكثر معادن هذه المجموعة شيوعا ، وهو المكوّن الأولى للجص. ويتكون

معدن الجبس نتيجة بخر ماء البحر، حيث يتحد أيونا الكالسيوم Ca^{2+} والكبريتات SO_4^{2-} وهما أيونان شائعان فى ماء البحر، ويترسب الجبس كطبقات فى الرواسب، مكوّنا كبريتات الكالسيوم $CaSO_4.2H_2O$ ، (النقطة فى هذه الصيغة تعنى أن جزيئى الماء مرتبطان مع أيونات الكالسيوم والكبريتات) . أما معدن الأنهيدريت $CaSO_4$ والذى يختلف عن معدن الجبس فى عدم احتوائه على الماء . وقد اشتق اسم معدن الأنهدريت من كلمةanhydrous والتى تعنى "دون ماء". ومعدن الجبس يكون مستقرا تحت درجات الحرارة والضغط المنخفضة السائدة عند سطح الأرض ، بينما يكون معدن الأنهدريت مستقرا عند درجات الحرارة الأعلى ، وضغوط الصخور الرسوبية المدفونة .

ولا ترجع أهمية البنية البلورية والتركيب الكيميائى للمعادن إلى الحاجة إليها فى ترتيب معلوماتنا عن المعادن فقط ، ولكن للحاجة إليها أيضا فى تعرف الخواص الفيزيائية للمعادن وهو ما سنناقشه فيما يلى :

VII الخواص الفيزيائية للمعادن

يستخدم الجيولوجيون التركيبات الكيمائية وبنيات المعادن لفهم أصل الصخور التى تكوّنها هذه المعادن ، وبالتالى يمكن فهم طبيعة العمليات الجيولوجية التى تعمل داخل وفوق سطح الأرض. ويبدأ هذا الفهم غالبا فى الحقل بمحاولات التعرف وتصنيف المعادن غير المعروفة حيث يعتمد الجيولوجيون على الخواص الكيميائية والفيزيائية التى يمكن ملاحظتها بسهولة إلى حد ما . وقد اعتاد الجيولوجيون منذ القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين حمل أدوات للتحليل الكيميائى الأولى للمعادن فى الحقل للمساعدة فى التعرف عليها. وأحد هذه الاختبارات استخدام حمض الهيدروكلوريك المخفف (HCl) على المعدن لرؤية فورانه من عدمه. ويدل الفوران على هروب ثانى أكسيد الكربون (CO_2) مما يعنى احتمال أن يكون المعدن كربوناتي التركيب . وسنستعرض فى بقية هذا الفصل الخواص الطبيعية للمعادن التى يدل الكثير منها على قيمتها العملية التطبيقية أو استخدامها كأحجار كريمة.

أ ـ الصلادة

الصلادة **hardness** إحدى الصفات المهمة للمعادن ، وهى صفة تعبر عن مقاومة المعدن للخدش. فكما أن الماس وهو أعلى المعادن المعروفة صلادة يخدش الزجاج ، فالكوارتز يخدش الفلسبار لأنه أكثر صلادة منه . ولا يتطلب قياس الصلادة وسائل خاصة ، حيث ابتكر فريدرك موهز Friedrich Mohs عام 1882م مقياسا للصلادة يعرف **بمقياس موهز للصلادة Mohs scale of hardness** ، ويتكون من عشرة معادن ذات صلادات متدرجة . وقد أعطى كلا منها رقما يبدأ من أقلها صلادة وهو التلك الذى يحمل رقم (1) إلى أكثرها صلادة وهو الماس ويحمل رقم (10) . ويستطيع المعدن الأعلى فى الترتيب أن يخدش المعدن الأدنى فى الترتيب . وبالتالى فإن الماس يستطيع أن

يخدش الكوارتز (7) ، بينما يستطيع الكوارتز أن يخدش كل المعادن التى تليه على المقياس مثل الكالسيت (3) (جدول 3.2).

وما يزال مقياس موهز أحد أفضل الوسائل العلمية لتعريف معدن غير معروف. فيستطيع جيولوجى الحقل عن طريق استخدام نصل سكين ، وبعض المعادن المعروفة على مقياس الصلادة ، تحديد موقع معدن غير معروف على مقياس موهز للصلادة. فإذا كان المعدن غير المعروف يمكن أن يُخدش بقطعة من الكوارتز، ولكن لا يخدش نصل السكين، فالمعدن يقع بين 5و7 على المقياس.

ونظرا لأن الروابط التساهمية تكون عموما أقوى من الروابط الأيونية ، وحيث إن صلادة أى معدن تعتمد على قوة رابطته الكيميائية ، فكلما كانت الرابطة قوية كان المعدن أكثر صلادة . ونظرا لعدم ثبات البنية البلورية فى معادن مجموعة السيليكات ، فإن صلادتها تتغير أيضا . فصلادة معادن السيليكات تتفاوت من 1 فى التلك (سيليكات صفائحية) إلى 8 فى التوباز (معدن سيلكيات مكون من رباعيات الأوجه المفردة). وتقع معظم السيليكات فى المدى بين 5-7 على مقياس موهز للصلادة ، باستثناء السيليكات الصفائحية التى تكون درجة صلادتها منخفضة، وتتراوح بين (1) و (3) .

جدول (3.2) – مقياس موهز للصلادة

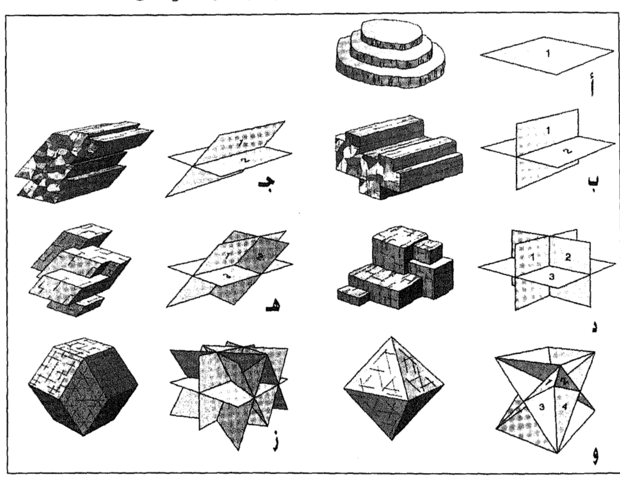
الرقم النسبى فى المقياس	المعدن	صلادة المواد الشائعة
10	الماس	
9	الكورندم	
8	التوباز	
7	الكوارتز	
6	الفلسبار البوتاس	
		نصل سكين ، زجاج نافذة
5	الأباتيت	
4	الفلوريت	
		عملة نحاسية
3	الكالسيت	
		ظفر الإنسان
2	الجبس	
1	التلك	

ب ـ الانفصام

الانفصام cleavage هو قابلية بلورة معدن ما للتكسر على امتداد أسطح مستوية معينة، وينتج عنها أسطح جديدة تعرف بمستويات الانفصام. كما يستخدم المصطلح أيضا لوصف نمط الأشكال الهندسية الناتجة عن هذا التكسر. ويتناسب الانفصام عكسيا مع قوة الرابطة الكيميائية ـ فكلما كانت الرابطة أكثر قوة كان الانفصام أكثر ضعفا والعكس بالعكس . ولذلك تتميز المعادن ذات الرابطة التساهمية القوية عموما بانفصام ضعيف أو عدم وجود انفصام على الإطلاق . أما المعادن ذات الرابطة الأيونية الضعيفة نسبيا فإنها تتميز بانفصام كامل. فمعدن المسكوفيت وهو أحد معادن مجموعة الميكا السيلكياتية له بنية

صفائحية على امتداد أسطح ناعمة مستوية ومتوازية، وذات بريق، مما يؤدى إلى تكوّن صفائح رقيقة شفافة سمكها أقل من مليمتر واحد. ويرجع وجود الانفصام التام فى معادن الميكا إلى ضعف الروابط التى تفصل بين الطبقات المكونة من صفائح الميكا، والتى تتكون من رباعيات الأوجه السيليكياتية (شكل 18.2)، وتشبه طبقة الزبد الموضوعة بين شطيرتى الخبز. ويصنف الانفصام طبقا لعدد مستويات الانفصام ونمطه، وكذلك نوعية الأسطح الفاصلة ومدى سهولة عملية الانفصام.

عدد مستويات الانفصام ونمطه: يعتبر عدد مستويات الانفصام ونمطه أحد السمات المميزة للعديد من المعادن المكوّنة للصخور (شكل 21.2). فمعدن المسكوفيت له مستوى انفصام واحد، بينما يتميز الكالسيت والدولوميت بوجود ثلاثة مستويات انفصام، مما يؤدى إلى تكوّن شكل معينى الأوجه.



شكل (21.2): مستويات الانفصام وأنماطها

(أ) اتجاه واحد للانفصام (مثل الميكا). (ب) مستويان للانفصام يتقاطعان عند 90^o (مثل الفلسبار).

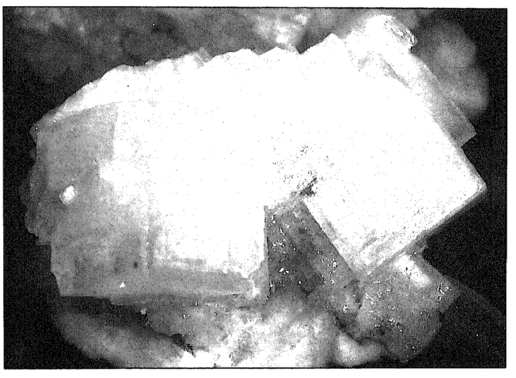
(جـ) مستويان للانفصام يتقاطعان عند زوايا مختلفة عن 90^o (مثل الأمفيبول). (د) ثلاثة مستويات انفصام تتقاطع عند 90^o (مثل الهاليت).

(هـ) ثلاثة مستويات انفصام تتقاطع عند زوايا تختلف عن 90^o (مثل الكالسيت). (و) أربعة مستويات انفصام (مثل الماس).

(ز) ستة مستويات انفصام (مثل السفاليريت).

وتحدد البنية البلورية للمعدن مستويات الانفصام وعدد أوجه البلورة. وتتميز البلورات عموما بوجود عدد من مستويات الانفصام أقل من عدد أوجهها البلورية . حيث تتكون الأوجه البلورية على امتداد العديد من المستويات التى تحددها صفوف من الذرات أو الأيونات ، بينما تتكون مستويات الانفصام على امتداد بعض هذه المستويات فقط ، عندما تكون الرابطة الكيميائية ضعيفة.

قيمة الزاوية المحصورة بين مستويات الانفصام التعرف على مجموعتين مهمتين من السيليكات هما معادن البيروكسين والأمفيبول . أما معادن البيروكسين فتكون مستويات الانفصام متعامدة تقريبا على بعضها البعض (93°) . ويبدو الانفصام فى القطاع المستعرض لها على هيئة مربع تقريبا. أما معادن الأمفيبول فتتقاطع مستويات الانفصام مع بعضها البعض بزوايا 56° و124°. ويبدو الانفصام فى القطاع المستعرض لمعادن الأمفيبول على هيئة شكل معينى.



شكل (**22.2**): بلورات معدن هاليت ذات انفصام مكعبى (ثلاثة مستويات انفصام كاملة تتقاطع عند زاوية قدرها **90**°) . (مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان . قسم الجيولوجيا – جامعة عين شمس) .

وقد تتميز كل بلورات المعدن بوجود الانفصام المميز ، إلا أن بعض البلورات قد تظهر بعض الأوجه الخاصة . فبلورات معدن الجالينا PbS والهاليت NaCl (شكل 22.2) ، تنفصل على امتداد ثلاثة مستويات مكوّنة مكعبات كاملة . ويمكن اعتمادا على

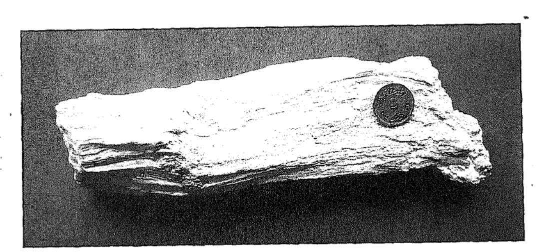
نوعية سطح الانفصام وسهولته: يعتمد وصف انفصام المعدن على نوع الأسطح الناتجة عن الانفصام وسهولته . فقد يوصف الانفصام بأنه تام perfect إذا كان ينفصم بسهولة مكوّنا أسطح ناعمة ومستوية تماماً، كما فى معدن المسكوفيت . وقد يوصف الانفصام بأنه

جيد good إذا كانت أسطح الانفصام ليست بنفس درجة النعومة التى نراها فى معادن الميكا . وقد يوصف الانفصام بأنه واضح (مقبول) fair إذا كان المعدن يتكسر بسهولة نسبية عبر مستويات غير مستويات الانفصام ، مثل معدن البيرل .

وعلى الجانب الآخر ، فإنه يوجد عديد من المعادن التى تتميز برابطة كيميائية قوية ، وبالتالى لا يوجد بها أى نوع من أنواع الانفصام. فمعدن الكوارتز (سيليكات ذات ترابط هيكلى) وهو أحد أكثر المعادن شيوعاً فى القشرة الأرضية ،يتميز ببنية ذات ترابط قوى فى كل الاتجاهات ، لدرجة أنه يتكسر فقط على أسطح غير مستوية. أما معدن الجارنت (سيليكات رباعية الأوجه مفردة) فتكون الرابطة الكيميائية فيه قوية فى كل الاتجاهات ، وبالتالى لا يوجد به أى سطح انفصام. وبصفة عامة ، فإن السيليكات ذات الترابط الهيكلى، وأيضا السيليكات رباعية الأوجه المفردة لا يوجد بها أى نوع من الانفصام .

ج ـ المكسر

يعرف المكسر **fracture** بأنه قابلية بلورة معدن ما لأن تتكسر تكسرا غير منتظم ، وغير مواز لأسطح الانفصام أو الأوجه البلورية. وتتكسر كل المعادن إما عبر مستويات الانفصام وإما فى أى اتجاه آخر، مثل الكوارتز الذى يتميز بغياب الانفصام . والمكسر يكون شائعا فى المعادن ذات التراكيب المعقدة ، حيث لا توجد اتجاهات لروابط شديدة الضعف . ويرتبط المكسر بطريقة توزيع قوى الروابط التى تمر عبر أوجه البلورة. حيث يؤدى كسر هذه الروابط إلى مكسر غير منتظم. ويوصف المكسر بأنه محارى conchoidal عندما يكون سطح المكسر ناعما ومنحنيا ويشبه السطح المكسور لقطعة سميكة من الزجاج أو الشكل الداخلى لصدفة المحار، ومن أمثلة ذلك مكسر الكوارتز والجارنت. أما سطح المكسر الذى يشبه قطعة الخشب المشقوقة ، فيوصف بأنه ليفيى fibrous (شكل 23.2) أو شظوى splintery . ويعتمد شكل ومظهر مكسر



شكل (23.2): إسبستوس يوضح المكسر الليفى **fibrous fracture** لمعدن الإسبستوس ، من منجم حفافيت – الصحراء الشرقية – مصر . (مجموعة أ.د. محمود فوزى الرملى ، متحف قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر) .

المعادن على البنية الخاصة لهذه المعادن وتركيبها الكيميائى .

د ـ البريق

يعرف البريق **luster** بأنه مظهر المعدن عند انعكاس الضوء على سطحه ، وتستخدم المصطلحات الواردة فى جدول (4.2) فى وصف بريق المعادن . ويعتمد بريق المعادن على البنية البلورية لها وما تحويه من ذرات ، وأيضا على نوع الرابطة الكيميائية بين ذراتها ، والتى تؤثر على مرور الضوء خلال المعدن أو انعكاسه على سطحه. فتميل البلورات ذات الرابطة الأيونية لأن تكون ذات بريق زجاجى glassy أوvitreous ، بينما يكون بريق المعادن ذات الرابطة التساهمية أكثر تنوعا ، فيكون لبعضها بريق ماسى مثل بريق الماسadamantine luster ، بينما تبدى الفلزات النقية بريقا فلزيا metallic luster مثل الذهب وكذلك الكبريتيدات مثل الجالينا PbS . أما البريق اللؤلؤى pearly luster فينتج من انعكاسات عديدة للضوء من مستويات تحت أسطح المعادن شبه الشفافة ، مثل السطح الداخلى لأصداف المحارات المتكوّنة من معدن الأراجونيت. وعلى الرغم من أن نوعية البريق هى صفة مهمة للتعرف على المعادن فى الحقل، إلا أنها تعتمد بدرجة كبيرة على الإحساس بالضوء المنعكس. وكذلك فلابد من الخبرة فى التعرف على نوعية البريق أثناء مسك المعدن باليد. وتجدر الملاحظة أن المعادن التى ليس لها بريق يقال إن لها بريقا منطفئا.

جدول (4-2) المصطلحات المستخدمة فى وصف بريق المعدن

فلزى Metallic	انعكاسات قوية من أسطح المعادن المعتمة (مثل الذهب والجالينا)
زجاجى Vitreous	لامع كما فى الزجاج (مثل معدن الكوارتز والكالسيت)
صمغى Resinous	مميز للمواد الصمغية (كما فى مادة العنبر)
شحمى(دهنى)Greasy	يبدو المظهر كما لو أن السطح مغطى بمادة زيتية (مثل معدن الكبريت)
لؤلؤى Pearly	بريق أبيض مثل بريق حبات اللؤلؤ (مثل معدن المسكوفيت)
حريرى Silky	بريق المواد الليفية مثل الحرير (مثل بعض أنواع معدن الجبس)
ماسى Adamantine	البريق اللامع للماس والمواد الشبيهة

هـ ـ اللون والمخدش

يظهر الضوء لون المعدن **color** سواء كان منعكسا أو نافذا خلال بلورات المعدن فى الكتل غير المنتظمة منه . أما المخدش **streak** فهو مصطلح يطلق على لون مسحوق المعدن الناتج عن حك المعدن على سطح خشن صلب مثل قطعة من الخزف غير المصقول يطلق عليه لوح المخدش streak plate . ويعتبر لوح المخدش وسيلة مهمة لفحص لون المعدن ، لأن الحبيبات الدقيقة المتساوية الحجم فى مسحوق المعدن تسمح بفحص لون المعدن بطريقة أفضل من فحصه ككتلة كاملة من المعدن. فعلى سبيل المثال، فإن معدن الهيماتيت Fe_2O_3 قد يكون لونه أسود أو أحمر أو بنيًّا، بينما يكون لون مخدشه بنيًّا مائلاً إلى الحمرة دائما.

وينشأ اللون فى المعادن النقية من وجود أيونات معينة مثل الحديد أو الكروم ، والتى تمتص أجزاء من طيف الضوء . فالأوليفين المحتوى على عنصر الحديد مثلا، يمتص كل الألوان ماعدا اللون الأخضر الذى ينعكس فنراه أخضر اللون. أما الأوليفين النقى المحتوى على عنصر الماغنسيوم فيكون شفافا عديم اللون. وعموما، فإن معظم المعادن النقية ، ذات الروابط الأيونية ، والتى تكون مدارات أيوناتها الخارجية مشبعة ومستقرة، مثل معدن الهاليت، تكون عديمة اللون colorless . وعلى الجانب الآخر ، فإن كل المعادن الطبيعية تحتوى على شوائب من العناصر التى أمكن حديثا قياسها ، والتى تعرف بالعناصر الشحيحة trace elements (تركيزها أقل من 0.1% من العناصر المكونة للمعدن). فوجود العناصر الشحيحة فى المعادن المعروفة بأنها عديمة اللون يكسبها لونا ، حيث يؤدى وجود القليل من أكسيد الحديد فى بلورة معدن الفلسبار أن يكون لونها بنيا أو ذا حمرة واضحة . كما أن هناك عديدًا من المعادن الكريمة مثل الزمرد emerald (البريل الأخضر) والسافير (الكوراندم الأزرق) تكتسب ألوانها من شوائب العناصر الشحيحة التى توجد بها . فالزمرد يكتسب لونه الأخضر من الكروم، بينما يكتسب السافير لونه الأزرق من الحديد والتيتانيوم .

وعلى الرغم من أن لون المعدن هو أكثر الصفات وضوحا فى المعدن ، إلا أنه يعتبر أقل الصفات أهمية من حيث الاعتماد عليه فى تمييز المعدن. فبعض المعادن تبدى دائما نفس اللون ، مثل الكبريت أصفر اللون والملاكيت الأخضر الزاهى ، بينما يتغير لون بعضها مثل الكوارتز الذى يتغير لونه بدرجة كبيرة ، من عديم اللون إلى أبيض أو بنفسجى أو مدخن . كما أن عديدًا من المعادن تبدى اللون المميز على السطح المكسور حديثا فقط ، بينما يظهر البعض الآخر اللون المميز على السطح المتغير نتيجة التجوية .

و ـ الكثافة والكثافة النوعية

تعرف الكثافة **density** بأنها كتله وحدة الحجوم للمادة (يعبر عنها دائما بالجرام لكل سنتيمتر مكعب ، g/cm³). وقد حاول العلماء الوصول إلى طريقة سهلة لقياس هذه الخاصية ، حيث استخدمت **الكثافة النوعية specific gravity** كمقياس موحد للكثافة. وتعرف الكثافة النوعية أنها عبارة عن النسبة بين وزن المعدن فى الهواء إلى وزن حجم مساو له من الماء النقى عند 4°م. فمثلا، إذا كان وزن أى معدن يساوى أربعة أضعاف وزن حجم مساو له من الماء فإن الكثافة النوعية للمعدن تساوى 4.

وتعتمد الكثافة على الوزن الذرى لأيونات المعدن،ودرجة إحكام البنية البلورية للمعدن. فمعدن الماجنيتيت Fe_3O_4 كثافته 5.2 جم/ سم³ . وترجع هذه الكثافة العالية إلى الوزن الذرى العالى للحديد، كما ترجع أيضا إلى البنية البلورية المحكمة لهذا المعدن. ويشبه معدن الماجنيتيت فى كثافته العالية باقى معادن مجموعة السبينل كما أسلفنا سابقا. أما كثافة معدن الأوليفين والمحتوى على عنصر الحديد فتكون 4.4 جم/ سم³ ، وهى أقل من معدن الماجنيتيت ، وذلك

لسببين هما الوزن الذرى للسيليكون (وهو أحد العناصر المكوّنة لمعدن الأوليفين) الذى يكون أقل من الوزن الذرى للحديد، والبنية البلورية الأكثر إحكاما فى معدن الماجنيتيت (مجموعة السبينل) عنها فى معدن الأوليفين ، أما كثافة الأوليفين المحتوى على عنصر الماغنسيوم فتكون أقل من تلك التى تميز الأوليفين المحتوى على الحديد وتصل إلى 3.3 جم/ سم^3، حيث أن الوزن الذرى للماغنسيوم أقل بكثير من الوزن الذرى للحديد.

وتؤثر الزيادة فى الكثافة ، الناشئة عن الزيادة فى الضغط ، على درجة نفاذية الضوء وانتقال الحرارة والموجات الزلزالية فى المعادن. ولقد أظهرت التجارب أن بنية معدن الأوليفين تتحول إلى بنية أكثر إحكاما ، ومماثلة لمجموعة السبينل عند الضغوط العالية جدا ، والتى تتوافر عند عمق نحو 400 كم. أما عند الأعماق الأكبر من ذلك ، والتى تصل إلى 670كم ، حيث تتحول مواد الوشاح إلى معادن سيليكات ذات بنية بلورية أكثر إحكاما من البنيات السابقة فيتكون معدن بيروفسكيت ($CaTiO_3$ pervoskite) . ولضخامة حجم الوشاح السفلى، فإن السيليكات التى لها بنية معدن البيروفسكيت ربما تكون أكثر المعادن شيوعا فى الأرض كلها. ولقد ساعد علماء المعادن فى تصنيع بعض معادن البيروفسكيت لتصبح أشباه موصلات عند درجات الحرارة العالية والتى توصل الكهرباء بدون أية مقاومة ، وهى من أشباه الموصلات ذات القيمة التجارية العالية. ومن ناحية أخرى، فإن الحرارة تؤثر أيضا على الكثافة ، فكلما ارتفعت درجة الحرارة كانت البنية البلورية أقل إحكاما وأكثر تباعدا ، وبالتالى قلت الكثافة.

ز ـ هيئة البلورة

إن هيئة البلورة **crystal habit** لمعدن ما، هى الشكل أو الهيئة التى تبدو عليها البلورة أو التجمع البلورى. وتوصف غالبا هيئة البلورة طبقا للشكل الهندسى العام لها ، فنقول إن البلورة نصلية blades أى تشبه نصل النبات أو لوحية plates أى تشبه اللوح أو إبرية needles وهكذا. كما أن بعض المعادن التى لها هيئات مميزة تجعل من السهل التعرف على هذه المعادن . فمثلا بلورة معدن الكوارتز تكون على هيئة عمود سداسى يعلوه مجموعة من الأوجه الهرمية الشكل. ولا تعكس هذه الأشكال مستويات الذرات أو الأيونات فى البنية البلورية للمعدن فقط ، ولكنها تعكس أيضا سرعة واتجاه نمو البلورات . فالشكل الإبرى لبلورة ما، يعنى النمو السريع فى أحد الاتجاهات والبطء الشديد فى باقى الاتجاهات. أما البلورة التى تشبه اللوح، فإنها تنمو بسرعة فى كل الاتجاهات العمودية على اتجاه واحد للنمو البطىء للبلورة. أما البلورات الليفية فإنها تأخذ شكل ألياف عديدة طويلة ورفيعة على هيئة تجمع من الإبر الطويلة.

والخلاصة، فإن المعادن تتميز بعديد من الخواص الفيزيائية والكيميائية ، والتى تنتج عن التركيب الكيميائى والبنية البلورية الداخلية. ويكون عديد من هذه الخواص مفيدا للعاملين فى علم المعادن خصوصا والجيولوجيا عموما من أجل تعريف وتصنيف المعادن.

ويقوم الجيولوجيون بدراسة التركيب الكيميائى والبنية البلورية الداخلية للمعادن فى محاولة لفهم أصل الصخور التى تتكون منها المعادن ، وبالتالى طبيعة العمليات الجيولوجية داخل الأرض وفوق سطحها.

VIII. المعادن كأدلة على بيئات التكوين

لا تستخدم المعادن فقط كأحجار للزينة أو كمصادر لمواد ذات قيمة اقتصادية ، وإنما تستخدم أيضا كأدلة على الظروف الفيزيائية والكيميائية التى تكونت تحتها تلك المعادن، وبالتالى الصخور التى تحتوى تلك المعادن، والتى تتواجد فى مناطق لا يمكن مشاهدتها أو قياس العوامل المؤثرة فيها مباشرة.

وقد حدث تقدم هائل فى فهمنا لبيئات تكوين المعادن خلال دراسة المعادن فى المعمل ، حيث تمكن العلماء باستخدام تجارب مناسبة من تحديد درجات الحرارة والضغط العالية التى يتكون عندها الماس بديلا عن الجرافيت ، الذى يحتاج لدرجات حرارة وضغط أقل . فالماس والجرافيت هما معدنان ثنائيا الشكل ، أى أن كليهما يتكون من الكربون ، بينما يكون لهما بناءان بلوريان مختلفان . وحيث إنه من المعروف أن درجة الحرارة والضغط تزداد مع زيادة العمق فى القشرة الأرضية ، فإن الماس يتكون فى صخور الوشاح التى تتكون على عمق لا يقل عن 150 كم تحت سطح الأرض.

كما أن هناك مثالا آخر يرتبط بعملية التجوية ، حيث يتحكم المناخ الذى يتغير من بارد رطب إلى حار جاف فى توزيع المعادن فى الغلاف الصخرى للأرض أثناء عملية التجوية . ويمكن بذلك استنتاج المناخات التى كانت تسود الكرة الأرضية فى الماضى من أنواع المعادن المحفوظة فى الصخور الرسوبية. كما يمكن أيضا تحديد التركيب الكيميائى لماء البحر فى الأزمنة الماضية من المعادن التى تكونت أثناء تبخر ماء البحر وترسيب الأملاح.

الملخص

1 ـ المعدن ، هو الوحدة البنائية للصخور، وهو كل مادة صلبة غير عضوية موجودة فى الطبيعة، لها بنية بلورية مميزة ، وتركيب كيميائى ثابت أو متغير فى مدى محدود .

2 ـ يتكون المعدن من ذرات، وهى أصغر وحدات المادة التى تدخل فى التفاعلات الكيميائية. وتتكون الذرة من نواة مكوّنة من بروتونات ونيترونات، تحيط بها مدارات تدور فيها الإلكترونات . والعدد الذرى للعنصر يساوى عدد البروتونات الموجودة فى نواته أو عدد الإلكترونات التى تدور حول النواة ، بينما يساوى الوزن الذرى له مجموع كتل البروتونات والنيترونات الموجودة فى نواته .

3 ـ تتفاعل المواد الكيميائية مع بعضها إما باكتساب الإلكترونات وإما فقدها لتتحول إلى أيونات ، وإما بالمشاركة فى الإلكترونات لتكوين مركبات كيميائية جديدة ، حيث يتم الارتباط بروابط أيونية فى الأولى أو تساهمية فى الثانية ، فى محاولة للوصول إلى حالة استقرار أغلفة الإلكترونات .

4 ـ عندما يتبلور معدن ما فإن الذرات أو الأيونات تتجمع بنسبة ثابتة لتتكون بنية بلورية ، هى عبارة عن صفوف هندسية فى الأبعاد الثلاثة يتكرر فيها الترتيب الأساسى فى كل الاتجاهات.

5 ـ تتكون البنية البلورية لمعادن السيليكات ، والتى تعتبر أهم المعادن المكوّنة للقشرة الأرضية، من رباعيات الأوجه السيليكاتية والمرتبطة بطرق عديدة منها : رباعيات الأوجه المفردة مثل الأوليفين أوفى حلقات مثل الكورديريت أو فى سلاسل مفردة مثل البيروكسينات أو فى سلاسل مزدوجة مثل الأمفيبولات أو فى صفائح مثل الميكا أو فى ترابط هيكلى فى الأبعاد الثلاثة مثل الفلسبارات ومعادن السيليكا.

6 ـ تتكون معادن الكربونات من أيون الكربونات الذى يرتبط بأيون الكالسيوم أو الماغنسيوم أو هما معا. أما معادن الأكاسيد فهى مركبات تتكون من الأكسجين والعناصر الفلزية . بينما تتكون البنية البلورية لمعادن الكبريتيدات والكبريتات من ذرات الكبريت المتحدة مع العناصر الفلزية.

7 ـ تعكس الخواص الفيزيائية للمعادن التركيب الكيميائى والبنية البلورية للمعادن . وتشمل الخواص الفيزيائية للمعادن الصلادة وهى مقاومة المعدن للخدش ، والانفصام وهو قابلية المعدن للتكسر أو الانفصال على امتداد أسطح مستوية فى المعدن ، والمكسر هو الطريقة التى يتكسر بها المعدن على امتداد أسطح غير منتظمة فيه ، والبريق وهو مظهر المعدن عند انعكاس الضوء على سطحه ، واللون الذى يظهر عندما ينفذ الضوء خلاله أو ينعكس على سطح بلوراته أو على سطح كتلة غير منتظمة الشكل منه ، والمخدش وهو لون مسحوق ناعم من المعدن ، والكثافة أو كتلة وحدة الحجوم ، والهيئة البلورية وهو الشكل أو الهيئة التى تبدو عليها البلورة أو التجمعات البلورية.

8 - تستخدم المعادن كأدلة على الظروف الفيزيائية (درجات الحرارة والضغط) والكيميائية التى تكونت عندها المعادن ، بالإضافة إلى استخدامها كمصادر لمواد ذات قيمة اقتصادية وكأحجار للزينة.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://mineral.galleries.com/
http://webmineral.com/
http://www.rockhounds.com/rockshop/table.shtml
http://www.prenhall.com/tarbuck

المصطلحات المهمة

amorphous materials	مواد غير متبلورة	ionic bond	رابطة أيونية
anion	أنيون	ionic substitution	إحلال أيونى
atom	ذرة	isotope	نظير
atomic mass	الكتلة الذرية أو الوزن الذرى	luster	بريق
atomic number	الرقم الذرى	magma	صهارة
cation	كاتيون	major elements	عناصر رئيسية
chemical reaction	تفاعل كيميائى	mineral	معدن
cleavage	انفصام	mineral group	مجموعة معدنية
color	لون المعدن	mineralogy	علم المعادن
covalent bond	رابطة تساهمية	mineraloid	شبه معدن
crystal	بلورة	Mohs scale of hardness	مقياس موهز للصلادة
crystal habit	هيئة البلورة	neutron	نيترون
crystal lattice	شبكة بلورية	nucleus (nuclei)	نواة (ج. نويات)
crystal structure	بنية بلورية	polymorph	متعدد الشكل
Crystalline material	مادة متبلورة	polymorphism	تعدد شكلى
crystallization	تبلور	precipitate	ترسيب
density	كثافة	proton	بروتون
electron	إلكترون	shell	غلاف
electron sharing	مشاركة الإلكترون	specific gravity	كثافة نوعية
fracture	مكسر	streak	مخدش
hardness	صلادة	trace element	عنصر شحيح
ion	أيون		

الأسـئلة

1 ـ عرِّف المعدن.

2 ـ ما الفرق بين الذرة والأيون ؟ اذكر الوحدات التى تتكون منها الذرات.

3 ـ ارسم البناء الذرى لكلوريد الصوديوم.

4 ـ اذكر أنواع الروابط الكيميائية .

5 ـ ما المعدنان اللذان يمثلان التعدد الشكلى لعنصر الكربون ؟

6 ـ اذكر البنية الأساسية لمعادن السيليكات.

7 ـ كيف تميز بين البلورة والمادة المتبلورة؟

8 ـ ما الخاصية المشتركة التى تميز المعادن الحديدوماغنيسية ؟ اذكر أمثلة للمعادن الحديدوماغنيسية .

9 ـ ما العاملان اللذان يؤثران على كثافة معادن الوشاح ؟

10 ـ هل توجد علاقة بين الانفصام الكامل والبنية البلورية فى الميكا ؟ لماذا لا يوجد انفصام فى معادن الكوارتز والأوليفين؟

11 ـ ما الفرق بين المعادن والصخور؟

12 ـ ما الفرق بين السيليكون والسيليكات ؟

13 ـ ما العوامل التى تحكم إحلال عنصر محل آخر فى معدن؟

14 ـ لماذا تختلف الخصائص الفيزيائية لكل من الجرافيت والماس بدرجة كبيرة؟

الفصل 3

الصخور : سجل العمليات الجيولوجية

I. الصخور النارية :

أ. الصخور النارية المتداخلة

ب. الصخور النارية المنبثقة

ج. الصخور النارية الشائعة

II. الصخور الرسوبية :

أ. الرواسب الفتاتية

ب. الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية

ج. التصخر : تحول الراسب إلى صخر صلب

د. الصخور الرسوبية الشائعة

III. الصخور المتحولة :

أ. التحول الإقليمى والتحول التماسى (الحرارى)

ب. الصخور المتحولة الشائعة

IV. تواجدات الأنواع المختلفة للصخور :

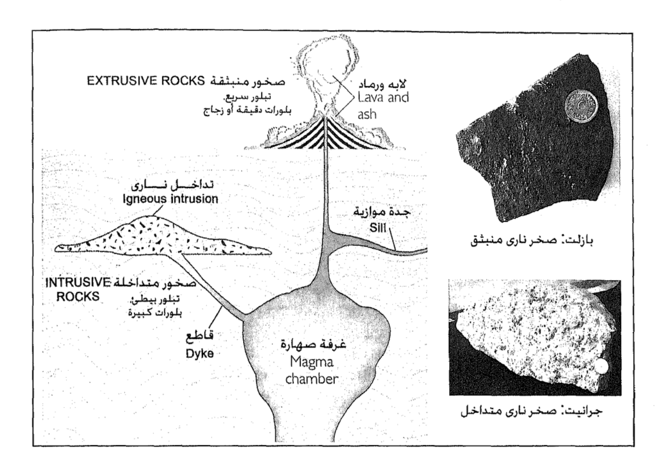
V. دورة الصخور :

أ. دورة الصخور وتكتونية الألواح

يتكون الغلاف الصخرى للأرض من ثلاثة أنواع من الصخور ، هى الصخور النارية والرسوبية والمتحولة . ويُعرف الصخر بأنه كل مادة صلبة متماسكة غير حية تكونت طبيعيا من معدن واحد أو من خليط من عدة معادن ، وتكوّن جزءا من كوكب. وتتنوع الصخور فى ألوانها وفى حجم البلورات أو الحبيبات المكوّنة لمعادنها ، وأيضا فى أنواع المعادن التى تكوّنها . ويحدد مظهر الصخور وصفاتها تركيبها المعدنى ونسيجها. فالتركيب المعدنى mineralogical composition أى نسب مكونات الصخر من المعادن تساعد فى تحديد مظهر الصخر ، بالإضافة لعديد من الصفات الأخرى . كما يساهم **النسيج texture** وهو مايطلق على حجم وشكل وطريقة ترتيب بلورات وحبيبات المعدن المكوّنة للصخر ، والطريقة التى تتواجد بها تلك المكونات مع بعضها البعض ، فى تحديد سمات وخصائص الصخر أيضا. وتصنف عادة هذه البلورات أو الحبيبات ، والتى لا يتجاوز قطرها عدة ميلليمترات قليلة فى معظم الصخور إلى خشنة coarse ، إذا كانت الحبيبات كبيرة لدرجة يمكن تمييزها بالعين المجردة، أو دقيقة fine إذا لم يكن من الممكن تميزها بالعين المجردة . كما يمكن أن تختلف أيضا بلورات أو حبيبات المعدن فى الشكل أو الهيئة ، حيث تكون إبرية الشكل needle-shaped أو مسطحة flat أو لوحية platy أومنشورية prismatic أو صفائحية tabularأو متساوية الأبعاد equant أى لها نفس البعد فى كل الاتجاهات مثل الكرة أو المكعب . وتؤدى هذه الاختلافات فى التركيب المعدنى والنسيج إلى عديد من الملامح والمظاهر الكبيرة التى تميز بين الأنواع المختلفة للصخور. كما تساهم أيضا فى تحديد الأصل الجيولوجى للصخور ، أى تحديد مكان وطريقة تكوينها . وتمثل الصخور النارية 95٪ من حجم الصخور المكونة للقشرة الأرضية ، بينما تمثل الصخور الرسوبية 5٪ منها ، غير أن الصخور الرسوبية تغطى 75٪ من مساحة الأرض فقط مقارنة بالصخور النارية التى تغطى نحو 25٪ منها (شكل 4.3). ونعرض فيما يلى وصفا تفصيليا لكل نوع من الأنواع .

I. الصخور النارية

تتكون **الصخور النارية igneous rocks** (مشتقة من كلمة ignis أى نار باللاتينية) من تبلور مادة **الصهارة أو الماجما magma** (والماجما كلمة يونانية تعنى الجسم اللدن) . والصهارة هى مادة صخرية منصهرة كليا أو جزئيا ثقيلة القوام لزجة ، توجد فى أعماق بعيدة تحت سطح القشرة الأرضية أو فى الوشاح العلوى ، حيث تصل درجة الحرارة إلى 700° مئوية أو أكثر ، وهى درجة حرارة تكفى لصهر معظم الصخور. وعندما تبدأ الصهارة فى التبرد التدريجى فى باطن الأرض ، تتكون بلورات صغيرة ميكروسكوبية الحجم. وعندما تصل



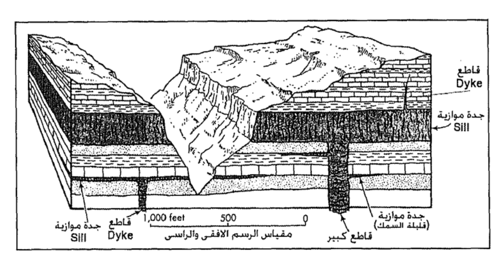
شكل (1.3): تتكون الصخور النارية عندما تصعد الصهارة إلى سطح الأرض وتبرد بسرعة لتكوّن رمادًا بركانيًّا دقيقًا أو لابة من بلورات دقيقة. ويكون الصخر المتكون دقيق التحبب أو مميز بنسيج زجاجى (مثل البازلت أو الأنديزيت) . وتتبلور الصخور النارية المتداخلة عندما تتداخل الصهارة فى الصخور المحيطة المتواجدة تحت سطح الأرض . ويؤدى التبريد البطىء إلى تكوّن صخر خشن التحبب (مثل الجرانيت).

درجة حرارة الصهارة إلى أقل من درجة الانصهار ، تنمو بعض هذه البلورات ليصل قطرها إلى عدة ميلليمترات أو أكثر مكوّنة صخرا ناريا خشن التحبب coarse-grained (شكل 1.3). ولكن عندما تنبثق الصهارة من بركان إلى سطح الأرض فإنها تعرف باللابة **lava** . وتبرد اللابة وتتجمد بسرعة ، حيث لا تجد البلورات الوقت الكافى للنمو التدريجى ، فتتكون سريعا بلورات دقيقة ، مكوّنة صخرًا ناريًّا دقيق التجنب. fine-grained ولذلك، فإن الصخور النارية تصنف اعتمادا على حجم البلورات بها إلى نوعين هما الصخور النارية المتداخلة والصخور النارية المنبثقة :

أ. **الصخور النارية المتداخلة**: ويطلق عليها أحيانا الصخور البلوتونية plutonic rocks . وتتكون الصخور النارية المتداخلة **intrusive igneous rocks** نتيجة التبلور البطىء لصهارة تداخلت فى الصخور الموجودة تحت سطح الأرض ، والتى يطلق عليها **صخر الإقليم أو صخر المنطقة country rock** . وتتميز الصخور النارية المتداخلة عادة بكبر حجم بلوراتها المتشابكة (المعشقة) ، والتى نمت ببطء نتيجة التبريد التدريجى للصهارة.

وتعرف كل أجسام الصخور النارية المتداخلة ، بغض النظر عن شكلها أو حجمها بالبلوتونات **plutons** . وتشمل البلوتونات الصغيرة كلا من القواطع والجدد الموازية (شكل 2.3) . والقاطع **dyke** هو جسم شبه صفائحى منضدى الشكل من الصخور النارية ، يقطع طبقات الصخور التى يتداخل فيها . أما الجدة الموازية **sill** فهى جسم شبه صفائحى منضدى الشكل من الصخور النارية التى تتواجد موازية لطبقات الصخور المحيطة التى تداخلت فيها . أما الباثوليث فهو أكبر أنواع البلوتونات . والباثوليث **batholith** جسم نارى متداخل غير منتظم الشكل يقطع طبقات الصخور التى يتداخل فيها (شكل 12.4) ، وقد تزيد بعض الباثوليثات عن 1000 كم طولا و 250 كم عرضا .

وبردت بسرعة باسم الصخور النارية المنبثقة **extrusive igneous rocks** ، والتى تعرف أيضا بالصخور البركانية volcanic rocks . وتتميز هذه الصخور بنسيجها الزجاجى glassy أو النسيج دقيق التحبب fine-grained . وتتكون الصخور النارية المنبثقة بالتبركن **volcanism** ، وهى العملية التى تصعد بالصهارة وما يصاحبها من فتات صلب وغازات إلى سطح الأرض والغلاف الجوى لتكوّن البراكين volcanoes . وقد تتكون هذه الصخور من لابة lava تتدفق مثل السوائل لمسافات على سطح الأرض قبل أن تتصلب ، أو من حبيبات رماد تبلورت تقريبا فى الحال عندما اندفعت عاليا فى الغلاف الجوى عند ثوران بركان ما. وقد تتساقط المواد البركانية من أفواه البراكين الثائرة ككتل أو ككرات أو قطع صغيرة أو كرماد بركانى ، أو حتى كمادة سائلة تتجمد قبل أن تسقط على الأرض . وقد



شكل (2.3): قواطع dykes وجدد موازية sills تداخلت فى الطبقات الرسوبية تحت سطح الأرض .
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ب. الصخور النارية المنبثقة: تسمى الصخور التى تكونت من صهارة انبثقت فوق سطح الأرض

يتساقط هذا الفتات النارى **pyroclasts** بجوار البركان مكونا جزءا منه، أو قد ينتشر لمسافات بعيدة بفعل الرياح.

الصخور النارية الشائعة

تكوّن معادن السيليكات معظم المعادن المكوّنة للصخور النارية ، ويرجع السبب فى ذلك إلى أن الصهير يحتوى على نسبة عالية من عنصر السيليكون والأكسيجين وهما يكوّنان أكثر من 70٪ من عناصر الصهير . كما أن عديدًا من معادن السيليكات وقليلاً من معادن الأكاسيد تنصهر عند درجات الحرارة والضغوط المميزة للأجزاء السفلية من القشرة الأرضية والوشاح. وتشمل معادن السيليكات الشائعة المتداخلة فى الصخور النارية الكوارتز والفلسبار والميكا والبيروكسين والأمفيبول والأوليفين ، وهى تتبلور على هيئة بنيات بلورية مختلفة . وهذا العدد المحدود من معادن السيليكات هو المسئول عن تكوين ما يزيد على 90٪ من الصخور النارية . ويوضح جدول (1.3) بعض أنواع الصخور النارية الشائعة .

II. الصخور الرسوبية

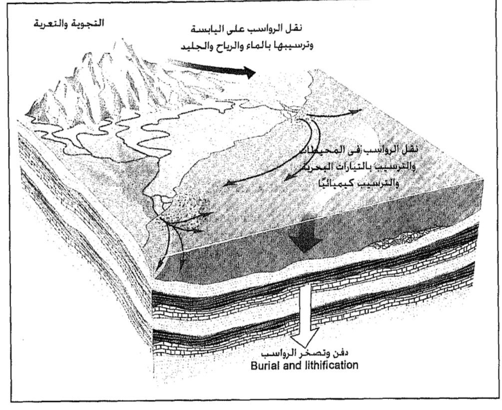
توجد الرواسب **sediments** (مستمدة من sedimentum وتعنى باللاتينية استقرار أو ترسب) على سطح الأرض على هيئة طبقات ، تتكون من حبيبات مفككة مثل : الرمل أو الغرين أو أصداف الكائنات الحية أو غيرها ، والتى تتكون منها الصخور الرسوبية بعد تصخرها . وتتكون هذه الحبيبات عند سطح الأرض نتيجة لتجوية **weathering** أنواع الصخور المختلفة النارية أو الرسوبية أو المتحولة . بمعنى أن عمليات التجوية تؤدى إلى تفتت الصخور إلى كسرات مختلفة الأحجام ، بالإضافة إلى مواد ذائبة فى الماء . وتنقل أجزاء الصخر المتكسر والمواد المذابة ، والناشئة عن عملية التجوية ، بعوامل التعرية **erosion** المختلفة (وهى مجموع العمليات التى تتفكك بها التربة والصخور وتحركها إلى أسفل التلال والمنحدرات أو إلى مجارى المياه) حيث ترسب على هيئة طبقات من الرواسب (شكل

جدول 3 – 1: بعض الصخور النارية الشائعة

المجموعة	نوع الصخر	تركيب الصخر
صخور نارية متداخلة[1] Intrusive	جرانيت Granite	معادن فلسية فاتحة اللون، تشمل أساسا : الكوارتز، وفلبسار بوتاسى وفلسبار البلاجيوكليز الصودى والميكا.
	ديوريت Diorite	معادن البلاجيوكليز والهورنبلند وبعض البيوتيت والبيروكسين .
	جابرو Gabbro	معادن مافية تشمل : البيروكسين والأوليفين ، بالإضافة إلى فلسبار البلاجيوكليز الكلسى.
	بريدوتيت Peridotite	معادن البيروكسين والأوليفين.
صخور نارية منبثقة[2] Extrusive	ريوليت Rhyolite	نفس التركيب المعدنى للجرانيت
	أنديزيت Andesite	نفس التركيب المعدنى للديوريت
	بازلت Basalt	نفس التركيب المعدنى للجابرو

1) صخور بردت تحت سطح الأرض ، وتتميز المعادن المكونة للصخر بأنها خشنة التحبب ، ويمكن رؤيتها بالعين المجردة.

2) صخور بركانية بردت فوق سطح الأرض ، وتتميز المعادن المكونة للصخر بأنها دقيقة التحبب ، ولا يمكن تمييزها بالعين المجردة ، وقد تحتوى على مواد غير متبلورة (زجاج).



شكل (3.3): تؤدى التجوية weathering إلى تفتت الصخر إلى كسرات مختلفة الأحجام ، تحملها التعرية erosion إلى أسفل التلال والمجارى المائية لتترسب على هيئة طبقات من الرواسب ، وتتكون الرواسب الأخرى بالترسيب الكيميائى . وعندما تتراكم الطبقات وتدفن على أعماق أكبر، فإنها تتصخر وتكون صخرًا رسوبيًّا صلدًا .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

3.3). وتؤدى عمليتا التجوية والتعرية إلى تكون نوعين من الرواسب ، هما:

أ. الرواسب الفتاتية

تتكون الرواسب الفتاتية clastic sediments (اشتقت كلمة فتاتية clastic من الكلمة اليونانية klastos بمعنى مكسر أو مفتت) من قطع صخرية متكسرة وحبيبات مفككة ومترسبة بفعل عوامل طبيعية مثل : المياه الجارية أو الرياح أو الجليد ، حيث تعمل هذه العوامل على تقليل حجم القطع الصخرية وترسيبها فى مناطق جديدة . فالمياه الجارية تنقل الرواسب إلى البحيرات أو البحار والمحيطات لتترسب فيها ، كما يمكن للرياح أن تنقل كميات ضخمة من الرمال وغيرها من الرواسب الأدق حجمًا لأماكن بعيدة حيث تترسب. أما المثالج فإنها تنقل وترسب كميات كبيرة من المواد الصخرية مختلفة الأحجام. ويعكس التركيب المعدنى للرواسب طبيعة المواد الأصلية التى نتجت عنها هذه الرواسب . كما تدل الاختلافات بين الطبقات المتتالية على التغيرات التى حدثت عبر الزمن الجيولوجى .

ب- الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية
chemical and biochemical sediments

الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية chemical and biochemical sediments هى مواد كيميائية تشمل أيونات : الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم

والماغنسيوم والكلوريد والفلوريد والكبريتات والفوسفات، تكونت إما بالترسيب من الوسط الذى ذابت فيه مكونات الصخور أثناء التجوية ونقلها إلى مياه الأنهار أو البحار، أو استخرجتها كائنات حية من المحاليل التى ذابت فيها. فالكالسيت ($CaCO_3$) قد يرسب من المياه الدافئة، حيث يترسب ليكوّن الحجر الجيرى، كما تزيل الشعاب المرجانية والرخويات والطحالب كربونات الكالسيوم من محاليلها. كما يترسب الهاليت (كلوريد الصوديوم) وغيره من الأملاح سريعة الذوبان من المسطحات المائية المغلقة بالتبخير.

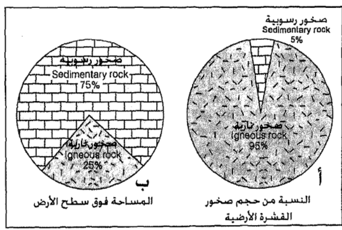
ج. التصخر

التصخر **lithification** هو تحول الراسب غير المتماسك إلى صخر صلد. وتحدث هذه العملية بطريقة من طريقتين هما:

- الكبس (الاندماج) compaction حيث ينقص حجم الرواسب ومساميتها تحت تأثير وزن مايعلوها من رواسب ليعطى كتلة أكبر كثافة من الكتلة الأصلية.
- التلاحم (السمنتة) cementation حيث تترسب المعادن حول الحبيبات المترسبة وتلحمها مع بعضهم البعض.

وتتم عملية الكبس والالتحام بعد الدفن تحت تأثير الطبقات المضافة من الرواسب. وهكذا يتكون الحجر الرملى نتيجة تصخر حبيبات الرمل، والحجر الجيرى نتيجة التحام أصداف الحيوانات وحبيبات كربونات الكالسيوم.

وتتميز الرواسب والصخور الرسوبية بخاصية التطبق **bedding**، أى تكون طبقات متوازية نتيجة هبوط الجزيئات إلى قاع البحر أو النهر أو سطح الأرض. وقد يعكس التطبق تغيرًا فى التركيب المعدنى مثلما يتطابق حجر رملى مع حجر جيرى، أو تغيرًا فى النسيج كما يتطابق حجر رملى خشن التحبب مع آخر دقيق التحبب.



شكل (**4.3**): نسب الأنواع المختلفة من الصخور. الكميات النسبية للصخور النارية والرسوبية (أما الصخور المتحولة فإنها تعتبر إما رسوبية وإما نارية طبقا لأصلها).

تكون الصخور النارية والمتحولة معظم القشرة الأرضية (أ)، بينما تغطى الصخور الرسوبية والرواسب معظم سطح الأرض وقاع المحيط، حيث إنها تكون طبقة رقيقة موزعة فوق تلك الصخور (ب).

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

جدول 3-2: بعض الصخور الرسوبية الشائعة

الراسب	نوع الصخر	وصف الصخر
فتاتية Clastic (يتكون من فتات صخرى أو معدنى)	كونجلومرات Conglomerates	يتكون من تلاحم حبيبات من صخور صلبة من مختلف الأحجام، ويزيد حجمها عموما عن 2 مم.
	حجر رملى Sandstone	حبيبات رمل متلاحمة (2 مم – 0.062 مم).
	حجر الغرين Siltstone	يتكون من حبيبات فى حجم الغرين (0.062-0.0039 مم)
	حجر الطين Mudstone	يتكون من حبيبات الغرين والصلصال. صخر كتلى به تطبق ضعيف أو لايوجد تطبق على الإطلاق.
	حجر الطفل Shale	يتكون من الغرين والصلصال ، ويتكسر بسهولة على امتداد مستويات التطبق.
كيميائية حيوية Bioclastic	الحجر الجيرى العضوى Limestone	يتكون نتيجة ترسيب كربونات الكالسيوم (كالسيت، أراجونيت) من المحاليل الجيرية أو من إفراز الكائنات العضوية كأصداف لها.
	التشرت Chert	يتكون من السليكا SiO_2 التى تفرزها الكائنات الحية على هيئة أصداف أو حبيبات دقيقة جدا من سيليكا غير متبلورة ، ويتميز بصلادته الشديدة وإمكانية تهذيبه.
	الصخور العضوية Organics	مثل الخث peat الذى قد يتحول إلى فحم . أما الزيت oil والغاز gas فهى مواد لا تصنف عادة مع الصخور الرسوبية، ولكنها تتكون نتيجة عمليات تحدث بعد الترسيب لمادة عضوية فى مسام الصخور الرسوبية.
كيميائية Chemical	الحجر جيرى Limestone	كربونات كالسيوم (كالسيت ـ أراجونيت) يترسب مباشرة من ماء البحر بطريقة غير عضوية.
	حجر الدولوميت Dolostone	يتحول الكالسيت أو الأراجونيت إلى دولوميت $CaMg(CO3)_2$ بعد الترسيب نتيجة إضافة أيونات ماغنسيوم من ماء البحر الذى يتخلل الرواسب.
	متبخرات Evaporites	تتكون من رواسب وصخور رسوبية كيميائية تكونت نتيجة تبخر ماء البحر أو البحيرات ، أو نتيجة تبلور كلوريد الصوديوم (الهاليت)، وكبريتات الكالسيوم (الجبس والأنهيدريت) واتحاد أيونات أخرى شائعة فى ماء البحر.

وتقدم لنا الصخور الرسوبية معلومات وفيرة عن تاريخ الأرض خلال النصف بليون سنة الأخيرة من عمرها ، بسبب ما تحتويه من حفريات fossils ، والتى تمثل بقايا الحياة القديمة النباتية والحيوانية المحفوظة فى ثنايا الصخور . وتمثل الطريقة التى تتكسر بها الحبيبات وطريقة ترسيبها وعلاقة الطبقات ببعضها ولون وتركيب الطبقات وآثار سقوط الأمطار بعض الشواهد التى توجد فى الصخور الرسوبية ، وتستخدم فى استنتاج تتابع الأحداث والمناخات القديمة .

وتغطى الصخور الرسوبية معظم سطح الأرض اليابس ، وكذلك قيعان البحار والمحيطات . وعلى الرغم

من أن معظم الصخور الموجودة فوق سطح الأرض هى صخور رسوبية ، إلا أنها تكوّن طبقة رقيقة فوق الصخور النارية والمتحولة ، والتى تمثل الحجم الرئيسى للقشرة الأرضية (شكل 4.3).

د. الصخور الرسوبية الشائعة

معادن السيليكات أكثر المعادن شيوعا فى الصخور الرسوبية الفتاتية ، وتشمل معادن الكوارتز والفلسبار والطين . أما أكثر المعادن شيوعا فى الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية فهى معادن الكربونات (مثل : الكالسيت والدولوميت) والجبس والهاليت . والكالسيت هو المكون الرئيسى للحجر الجيرى . أما الدولوميت فيتواجد فى صخور الحجر الجيرى أيضا ، ويتكون من كربونات الكالسيوم والماغنسيوم . ويتكون معدنا الجبس والهاليت نتيجة تبخر ماء البحر. ويوضح جدول (2.3) بعض أنواع الصخور الرسوبية الشائعة .

III. الصخور المتحولة

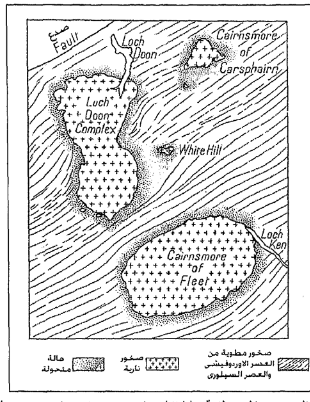
اشتق اسم الصخور المتحولة **metamorphic rocks** من كلمتين يونانيتين meta بمعنى تغير وmorph بمعنى شكل ، وهكذا فإن المصطلح يعنى تغير الشكل . وتتكون الصخور المتحولة عندما تتسبب درجات الحرارة العالية والضغوط المرتفعة فى أعماق الأرض فى تغير التركيب المعدنى أو النسيج أو التركيب الكيميائى لأى نوع من صخور سابقة (نارية أو رسوبية أو متحولة) ، حيث يساعد وجود الماء أو المحاليل المائية على إتمام عملية التحول .

ويحدث التحول عادة فى الحالة الصلبة. وتكون درجات الحرارة عموما تحت نقاط انصهار الصخور (نحو 900°م) ، ولكنها تكون عالية بدرجة كافية (فوق 250°م) لكى تسبب تحول الصخور عن طريق إعادة التبلور أو التفاعلات الكيميائية. ونعرض فيما يلى وصفا لأنواع التحول المختلفة :

أ. التحول الإقليمى والتحول التماسى (الحرارى)

قد يحدث التحول فى منطقة محدودة من الأرض ، كما يحدث على نطاق واسع . فعندما يمتد تأثير الحرارة والضغط العاليين على مسافات واسعة من القشرة الأرضية تصل إلى عشرات الآلاف من الكيلومترات المربعة ، فإن الصخور تتعرض للتحول الإقليمى regional metamorphism . وهو نوع من التحول يصاحب عمليات اصطدام الألواح التى تسبب بناء الجبال ، وطى وكسر طبقات الصخور الرسوبية ، والتى كانت يوما ما أفقية. كما أن هناك نوعا آخر من التحول يحدث إذا كانت درجات الحرارة محدودة وتؤثر فى مساحات أصغر من الأرض يعرف بالتحول التماسى contact metamorphism . ويحدث التحول التماسى نتيجة لتأثير درجات الحرارة الناتجة عن تداخل جسم نارى فى الصخور المحيطة ، ولذلك يسمى أيضا بالتحول الحرارى thermal metamorphism (شكل 5.3) .

وتتميز العديد من الصخور المتحولة تحولا إقليميا بوجود ظاهرة التورق foliation وهى أسطح مستوية أو متموجة تنشأ عندما تؤثر قوة تضاغط قوية من اتجاه محدد على صخر يعاد تبلوره ، وهو يؤدى إلى أن تنمو بلورات معادن مثل : الميكا والتورمالين والهورنبلند، بحيث تكون



شكل (**5.3**): يحدث التحول التماسى فى مساحة محدودة حول أجسام نارية متداخلة ، منطقة جالوى - جنوب غرب أسكتلندا. لاحظ وجود هالة متحولة metamorphic aureole حول الجسم النارى .
(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

أسطحها المستوية أو محاورها الطويلة فى اتجاه عمودى على اتجاه تأثير هذه القوة . وينتج عن هذا تكون صخر متورق ، حيث تتلون الراقات بألوان المعادن التى تكوّنها . فالإردواز slate صخر متورق دقيق التحبب ، والفلليت phyllite صخر متورق خشن التحبب ، بينما يكون الشست schist أكثر خشونة ، ويكون النايس gneiss هو الأخشن على الإطلاق . أما الأنسجة الحبيبية granular textures والتى تحتوى على بلورات متساوية الأبعاد ، فهى تتكون فى الصخور التى تتعرض لضغوط متساوية من كل الاتجاهات ، أو لا يوجد بها معادن لها سلوك نمو فى اتجاه محدد ، وبالتالى لا يوجد بها تورق . وتكون الأنسجة الحبيبية أكثر شيوعا فى الصخور المتحولة بالتلامس مثل الرخام marble . وقد تظهر الأنسجة الحبيبية فى القليل من الصخور المتحولة تحولا إقليميا عند درجة حرارة وضغط عاليين للغاية .

ب. الصخور المتحولة الشائعة

معادن السيليكات هى أكثر المعادن شيوعا فى الصخور المتحولة ، حيث تكونت هذه الصخور أصلا من تحول صخور أخرى كانت غنية بالسيليكات. والمعادن المميزة فى الصخور المتحولة هى : الكوارتز والفلسبارات والميكا والبيروكسين والأمفيبول ، وهى المعادن المميزة نفسها للصخور النارية . ولكن هناك معادن سيليكات أخرى مميزة للصخور المتحولة فقط ، وهى معادن الكيانيت والاشتوروليت وبعض أنواع الجارنت. وتتكون هذه المعادن فى القشرة الأرضية تحت ضغط وحرارة عاليين . وهذه المعادن لا توجد فى الصخور النارية ، ولذلك فإن وجودها دليل جيد على حدوث عملية التحول. كما يعتبر

جدول 3 - 3: بعض الصخور المتحولة الشائعة

النسيج	اسم الصخر	وصف الصخر
متورق Foliated (المعادن الصفائحية مرتبة فى مستويات متوازية)	إردواز Slate	يتكون نتيجة تعرض صخر الطفل للحرارة والضغط ، ويتميز بوجود معادن مسطحة ومستطيلة لا يمكن تعرفها بالعين المجردة، وينفصل الصخر إلى ألواح مسطحة صلدة.
	شست Schist	يتكون نتيجة تعرض الصخور لدرجات حرارة وضغط عالٍ ، ويتميز بوجود معادن مستطيلة ومسطحة (كلوريت ومسكوفيت وبيوتيت) تزيد نسبتها عن 50٪ ، ويمكن رؤيتها بالعين المجردة ، ويتكسر الصخر إلى أجزاء متموجة.
	نيس Gneiss	يتكون نتيجة تعرض صخور رسوبية فتاتية أو صخور نارية متداخلة للحرارة والضغط ، ويتميز بوجود شرائط أو تجمعات من معادن فاتحة اللون (كوارتز وفلسبار) تتبادل مع أخرى من معادن مستطيلة أو مسطحة (الميكا أو الأمفيبول) .
حبيبى (غير متورق) Granular (فسيفساء من معادن متساوية الأبعاد تقريباً مثل المكعبات)	رخام Marble	ينشأ نتيجة تحول الحجر الجيرى وحجر الدولوميت بالحرارة ، ويتكون معظمه من الكالسيت أو الدولوميت ، ويتراوح حجم الحبيبات فيه من دقيقة إلى خشنة .
	كوارتزيت Quartzite	صخر شديد الصلادة ، ينشأ عن التحول الحرارى لحجر رملى غنى بالكوارتز ، ويتكسر الصخر عبر حبيبات الكوارتز وليس عبر المادة اللاحمة للحبيبات، وقد توجد نسبة شوائب من الحديد أو غيره تعطى الصخر لونا مائلاً إلى الحمرة أو أى لون آخر.

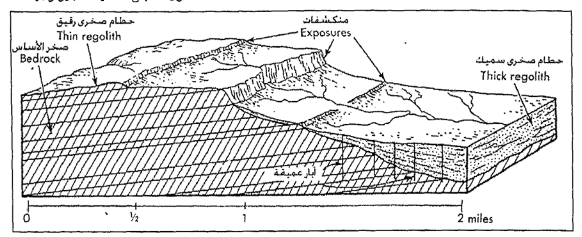
الكالسيت من المعدن الشائعة فى الصخور المتحولة ، وهو المعدن الرئيسى فى الرخام وهو صخر متحول عن الحجر الجيرى . ويوضح جدول (3.3) بعض أنواع الصخور المتحولة الشائعة.

IV. تواجد الأنواع المختلفة للصخور

لاتتواجد الصخور فى الطبيعة كأجسام منفصلة عن بعضها البعض ، بمعنى أن يكون هناك صخر نارى هنا ورسوبى هناك وصخور متحولة فى مكان آخر . بل على العكس من ذلك تتواجد الصخور المختلفة فى منطقة ما مختلطة مع بعضها بغير نظام ، وفى تسلسل زمنى يعكس تاريخها الجيولوجى .

ويقوم الجيولوجى بعمل خريطة تبين توزيع الصخور الموجودة فى منطقة ما على السطح ، ثم يحاول فهم تاريخها الجيولوجى من دراسة التنوع الحالى للصخور بها ، وعلاقة هذه الصخور بعضها ببعض وتوزيعها .

وتمثل **منكشفات الصخور outcrops** (شكل 6.3) وهى الأماكن التى يمكن فيها رؤية **صخر الأساس** الصلب **bedrock** وما يعلوه من تربة ومواد مفككة على السطح تعرف بالحطام الصخرى (الأديم) **regolith** ، المصدر الرئيسى للمعلومات عن صخور القشرة الأرضية وتوزيعها ، إلا أن الآلاف الآبار التى تم حفرها على



شكل (6.3): علاقة مواد الصخر المفكك بصخر الأساس bedrock الصلب ، والتى توجد دائما فى المناطق الرطبة التى تتميز بتضاريس غير منتظمة وتربة وفيرة . ويتغير سمك الحطام الصخرى regolith من صفر إلى مئات الأمتار ، أما صخر الأساس فيوجد دائما تحت السطح ، ويمكن الوصول إليه من خلال الآبار العميقة التى تخترق الأجزاء السميكة من الحطام الصخرى ، كما ينكشف صخر الأساس عند الجروف الحادة .
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

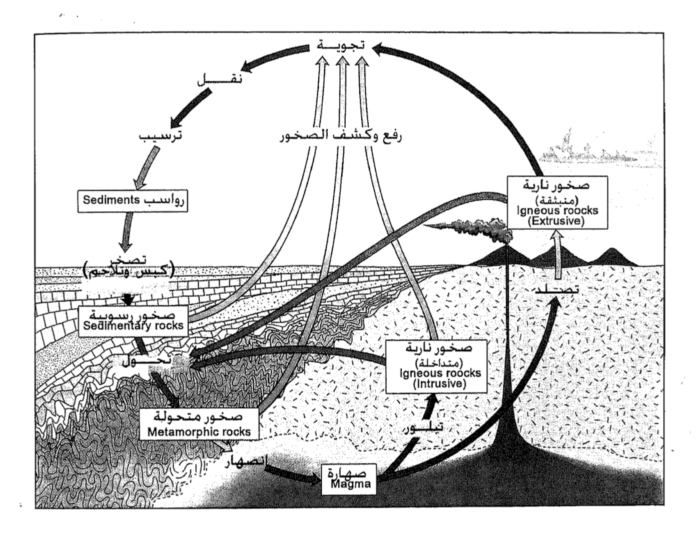
القارات أثناء البحث عن البترول والماء والمعادن ذات القيمة الاقتصادية ، قد أمدتنا بمعلومات وفيرة عن هذه الصخور أيضا . وقد اخترق الجزء الأكبر من هذه الآبار أجزاء ضحلة من القشرة الأرضية ، والتى تتكون فى معظمها من الصخور الرسوبية . ومع مواصلة الحفر لأعماق أكبر ربما تتراوح بين 6 و 10 كم فإن الآبار ستخترق صخورا نارية ومتحولة . ومن أجل الحصول على نتائج أكثر عن الأجزاء العميقة من القشرة الأرضية قامت العديد من الدول بما فيها الولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا وروسيا بحفر آبار إلى أعماق كبيرة على القارات . ويصل عمق أكبر بئر فى روسيا إلى أكثر من 12 كيلومترا ، وهو عمق يفوق أى عمق بئر تجارية تم حفرها.

V . دورة الصخور

تعرف دورة الصخور rock cycle بأنها مجموعة العمليات الجيولوجية التى يتكون بها أى من الأنواع الثلاثة للصخور وعلاقتها ببعضها البعض ، بالإضافة إلى معرفة نشأة تلك الأنواع المختلفة من الصخور . وقد وصف الأسكتلندى جيمس هاتون James Hutton هذه الدورة عام 1785م لأول مرة بصورة كاملة ، والتى تعرّف بعض عناصرها علماء آخرون فى انجلترا وأوروبا .

وسنقدم هنا وصفا لدورة واحدة ، آخذين فى الاعتبار أن مثل تلك الدورات تتغير زمانا ومكانا. فإذا بدأنا بالصهارة الموجودة فى أعماق الأرض حيث تكون الحرارة والضغط مرتفعين لدرجة تكفى لصهر أى نوع من الصخور الموجودة سابقا ، سواء كانت نارية أو متحولة أو رسوبية (شكل7.3) . وقد سمى جيمس هاتون هذا النشاط فى أعماق القشرة الأرضية باسم حدث بلوتونى plutonic episode نسبة إلى بلوتو Pluto الإله الرومانى لعالم ما تحت الأرض. والآن فإننا نسمى كل الصخور النارية المتداخلة intrusive rocks **بالصخور البلوتونية (السحيقة) plutonic rocks**. وعندما

تنصهر الصخور السابقة فإن محتوياتها من المعادن قد تنصهر كليا أو جزئيا ، وتصبح كل عناصرها الكيميائية متجانسة فى المحاليل الساخنة المتكونة منها، وتكوّن مايعرف بالصهارة . وعندما تبرد الصهارة تبدأ بلورات معادن جديدة فى النمو لتكوّن صخورا نارية جديدة ، وتعرف هذه العملية بالتبلور crystallization . وقد يحدث التبلور تحت سطح الأرض ، كما سبق أن ذكرنا ، ليكوّن الصخور النارية المتداخلة ، أو بعد انبثاق بركان فوق سطح الأرض ليكوّن الصخور البركانية.



شكل (7.3): دورة الصخور rock cycle . وهى توضح العلاقة بين العمليات الداخلية فى الأرض وخارجها ، وكيف أن كل نوع من أنواع الصخور الثلاثة مرتبط بالنوعين الآخرين .

تبرد الصهارة وتتصلد لتكوّن صخورا نارية igneous rocks . وتتكسر وتتحلل الصخور المنكشفة فوق سطح الأرض نتيجة التجوية لتكوّن رواسب ، تنقل وتترسب وتتصلب لتكوّن الصخور الرسوبية sedimentary rocks . ومع زيادة عمق الدفن تزيد درجة الحرارة والضغط ، مما يؤدى إلى تحول الصخور وتكوّن الصخور المتحولة metamorphic rocks أو انصهارها أو كليهما ، ثم ترتفع الصخور أثناء عمليات بناء الجبال والنشاطات البركانية ، لتعيد الدورة مرة أخرى ......وهكذا .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

وتتكـون الـصخور الناريـة أساسـا عـلى حـدود الألواح التكتونية المتباعـدة والمتقاربـة . كـما تتكـون الـصخور الناريـة أيـضا نتيجـة بلومـات **plumes** الوشاح (البلوم تيار صاعد يحمـل الحـرارة والمعـادن المنصهرة جزئيا من الأجزاء السفلى مـن الوشـاح إلى الأجزء العليا) . ويعـزو الـبعض النـشاط البركـانى داخل الألواح بعيدا عن حوافها إلى هذه البلومات.

وتصعد الصخور الناريـة المتكونـة عنـد حـواف الألواح المتصادمة ، مع الصخور الرسوبية والمتحولة المصاحبة لتكوّن سلسلة من الجبـال العاليـة ، حيـث يصبح جزءًا من القشرة الأرضية مشوها ومنضغطا . ويطلق الجيولوجيون على هـذه العمليـة والتـى تبـدأ باصطدام الألواح وتنتهى ببناء الجبال **بالتجبل (نشأة الجبـال) orogeny**. وتتعـرض هــذه الــصخور المرفوعة لعملية التجوية والتغير الكيميـائى ، بـسبب انتقالهـا إلى وسـط أكثـر بـرودة ورطوبـة عـن بـاطن الأرض الـساخن الـذى نـشأت بـه . فمـثلا تتكـون أكاسيد الحديد مـن معـادن الحديـد ، وتتغـير بعـض المعـادن المتكونـة فى درجـات حـرارة عاليـة مثـل الفلسبارات إلى معادن الطين ، كما تذاب بعض المواد مثل معادن البيروكسين تمامـا حـين تتـساقط عليهـا الأمطار. كما تؤدى تجوية الصخور الناريـة أيـضا إلى تكوين أحجام وأنواع مختلفة مـن الحطـام الـصخرى والمواد الذائبة والتى تحمل بعيدا بعوامل التعرية. بينما يتم نقل الـبعض الآخـر بالثـالج أو بميـاه المجـارى المائية والرياح إلى الأنهار ثـم إلى المحيطـات ، حيـث تترسب كطبقات من الرمل والغرين ، أو كرسوبيات أخرى تكونت من المواد الذائبة فى مياه البحار مثل معـادن كربونات الكالسيوم .

ويتم دفن هذه الرواسـب التـى تراكمـت فى البحـار ، وأيضا تلك المترسبة بالمياه أو الرياح عـلى اليابـسة ، تحـت طبقات متتابعة مـن الرسـوبيات حيـث تتـصخر تـدريجيا لتتحـول إلى صـخر رسـوبى . ويـصاحب عمليـة دفـن الصخور عملية هبوط **subsidence** ، وهى انخفـاض أو غوص لجزء من القشرة الأرضـية . وباسـتمرار عمليـة الهبوط تضاف طبقات أخرى من الرسـوبيات ، وتتحـول الرواسب فى النهاية إلى صخور رسوبية .

ويؤدى دفـن الـصخور الرسـوبية المتـصلدة فى أعـماق القشرة الرضية إلى رفع درجة حرارتها . وعندما يزيد عمق الدفن عن 10 كم ترتفع درجة الحرارة إلى أكثر من 300°م وتبدأ المعادن التى مازالت فى الحالة الصلبة فى التحـول إلى معادن أكثر اسـتقرارا عنـد درجـات الحـرارة والـضغوط العالية ، وتتحول بالتـالى الـصخور الرسـوبية الـسابقة إلى صخور متحولة جديدة . ومع زيادة التسخين قـد تنـصهر الصخور وتتكـون صـهارة جديـدة ، حيـث تتبلـور منهـا صخور نارية بادئة الدورة من جديد .

وعادة لا تكمل هـذه الـدورة بالتسلـسل الـذى سـبق وصفه . حيث يمكن أن يرفـع خـلال عمليـة التجبـل أى نوع من الصخور متحولا أو رسوبيا أو ناريا لتـتم تجويتـه وتعـريته ليكـوّن رواسـب جديـدة . كمـــا يمكـن تجـاوز بعض المراحل ، حيث يمكن أن ترفع الـصخور الرسـوبية ليتم تعريتها دون أن تتعرض للتحول أو الانصهار. كمـــا يمكن أن تحدث الدورة بترتيب مختلـف عـن ذلـك الـذى سبق عرضه ، مثل تعرض الصخر النارى المتكوّن فى باطن

الأرض للتحول ، قبل أن يرفع . فقد لوحظ أثناء حفر الآبار العميقة ، أن بعض الصخور النارية الموجودة على بعد عدة كيلومترات داخل القشرة الأرضية لم ترفع أبدا ، وبالتالى لم تتعرض للتجوية والتعرية.

ومما تجدر الإشارة إليه أن دورة الصخور لا تنتهى أبدا ، فهى تحدث دائما فى مراحل مختلفة وفى أماكن مختلفة من العالم ، حيث تتكون الجبال ويتم تعريتها فى مكان ما ، وتتراكم وتدفن الرواسب الناتجة فى مكان آخر. وعموما فإن الصخور التى تكوّن الجزء الصلب من الأرض تتعرض للمراحل المختلفة من الدورة باستمرار ، حيث نشاهد فقط بعض مراحل هذه الدورة على سطح الأرض ، ولكننا نتوقع حدوث المراحل الأخرى فى أعماق القشرة الأرضية والوشاح ، بناءً على ما نشاهده من الأدلة غير المباشرة .

أ. دورة الصخور وتكتونية الألواح

عندما اقترح جيمس هاتون دورة الصخور لأول مرة لم تتوافر لديه وقتها سوى معلومات قليلة عن العمليات التى يتكون بها أحد الصخور من النوعين الآخرين ، رغم وجود أدلة على ذلك . وفى الحقيقة ، فإن الدورة الكاملة للصخور لم تتضح إلا منذ عهد قريب ، بعد ظهور نظرية تكتونية الألواح .

ويمكن شرح الطريقة التى ترتبط بها دورة الصخور مع تكتونية الألواح مما يحدث عند حدود الألواح المتقاربة (شكل8.3) . حيث تنشأ الصهارة بسبب انصهار بعض أنواع الصخور فوق نطاق الاندساس subduction zone ، ثم تصعد تلك الصهارة خلال الغلاف الصخرى العلوى لأنها أقل كثافة من الصخور المحيطة ، وتتبلور وتكوّن الصخور النارية igneous rocks . وقد تتبلور بعض الصهارات قبل أن تصل إلى سطح الأرض لتكون الصخور النارية المتداخلة، بينما ينبثق البعض الآخر ويتصلب على سطح الأرض لتكون الصخور البركانية .

فإذا تعرضت الصخور النارية للغلاف الجوى ، وبالتالى للتجوية والتعرية ، فإن الحطام الصخرى والمواد المذابة تنتقل إلى الحواف القارية لترسب فى طبقات قد تصل إلى آلاف الأمتار سمكا . ومع مرور الوقت ، فإن طبقات الرواسب تتصخر لتكوّن وتدا سميكا من الصخور الرسوبية sedimentary rocks يحد القارات.

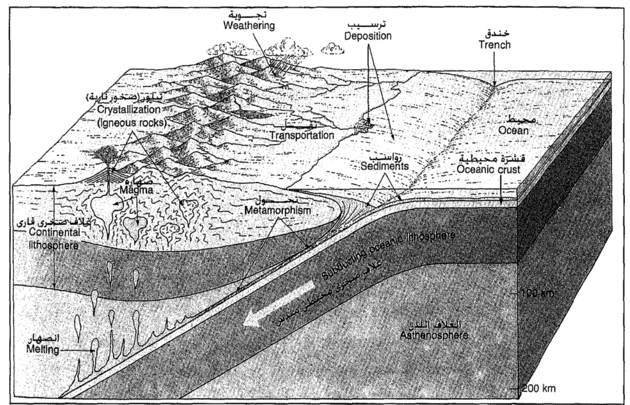
وقد يضطرب الهدوء النسبى للنشاط الرسوبى فى نهاية الأمر على امتداد الحافة القارية ، إذا أصبحت المنطقة عبارة عن حد لوح متقارب .وعندما يحدث ذلك ، فإن الغلاف الصخرى المحيطى المجاور للقارة يبدأ فى الهبوط والاندساس تحت القارة فى الغلاف اللدن (الأستينوسفير) . ويؤدى الاندساس على امتداد تلك الحواف القارية النشطة إلى تشوه الرواسب فى أحزمة طولية من الصخور المتحولة metamorphic rocks .

وعندما يستمر اللوح المحيطى فى الهبوط ، فإن بعض الرواسب التى لم تشوه أثناء تكوّن الجبال تحمل إلى أسفل فى الغلاف الصخرى اللدن (الأستينوسفير) الساخن ، حيث تتحول أيضا . وتنتقل فى النهاية بعض الصخور

المتحولـة إلى أعماق أكبر ، حيث ترتفع درجات الحرارة والضغط بدرجة تكفى لأن يحدث انصهارا جزئيا فتتكوّن الصهارة . وتصعد الصهارة المتكونة حديثا لتصعد إلى أعلى لتكوّن صخورا نارية . وهكذا تبدأ دورة الصخور من جديد .

الصخر فى باطن الأرض تحت الظروف المختلفة من الحرارة والضغط العاليين أو عند سطح الأرض حيث تكون الحرارة والضغط منخفضين.

2. تشمل الصخور ثلاثة أنواع رئيسية هى الصخور : النارية والرسوبية والمتحولة. وتشمل الصخور النارية



شكل (8.3): علاقة دورة الصخور بتكتونية الألواح كما يوضحها حد متقارب convergent boundary ، حيث يندس لوح محيطى تحت لوح قارى .
(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition.

الملخص

1. يحدد التركيب المعدنى (أنواع ونسبة المعادن المكوّنة للصخر) والنسيج (أحجام وأشكال وترتيب البلورات أو الحبيبات) نوعية الصخر . وهذان العنصران يحددهما الظروف الجيولوجية التى كانت سائدة أثناء تكوّن الصخر. وتشمل تلك الظروف التركيب الكيميائى سواء تكون

قسمان هما الصخور النارية المتداخلة ، والتى تتكون تحت سطح الأرض ، وتتميز غالبا ببلورات كبيرة الحجم ، والصخور النارية المنبثقة فوق سطح الأرض ، والتى تتميز بوجود نسيج زجاجى أو دقيق التحبب.

3. تتكون الصخور الرسوبية نتيجة تصخر الرواسب بعد دفنها. وتتكون نتيجة عمليات التجوية والتعرية للصخور المنكشفة عند سطح الأرض.

4. تتكون الصخور المتحولة نتيجة التغير فى الحالة الصلبة لصخور نارية أو رسوبية أو متحولة أخرى نتيجة تعرضها لدرجات حرارة أو ضغط عاليين فى باطن الأرض أو كليهما.

5. توضح دورة الصخور العلاقة بين الأنواع الثلاثة الرئيسية للصخور وتكوّنها من بعضها لبعض بالعمليات الجيولوجية التى تنشأ عن طريقها الصخور. ويمكن تعرف الدورة الجيولوجية بأن نبدأ عند أى نقطة فى الدورة. فإذا بدأنا بتكوين الصخور النارية من الصهارة فى باطن الأرض ، فإنه يتم رفعها إلى السطح أثناء عمليات بناء الجبال ، حيث تتعرض عند السطح للتجوية والتعرية ، والتى تؤدى إلى تكوين الرواسب. ثم تعود الرواسب إلى باطن الأرض بالدفن والتصخر لتكوّن الصخور الرسوبية. ويؤدى الدفن فى أعماق كبيرة من الأرض إلى التحول أو الانصهار حيث تبدأ الدورة مرة أخرى من أى من النقطتين.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.prenhall.com/tarbuck

http://www.uh.edu/~jbutler/anon/anoncoursepetr.html

http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/vwlessons/lessons/Slideshow/lgrocks/lgindex.html

http://uts.cc.utexas.edu/%7Ermr/index.html

المصطلحات المهمة

batholith	باثوليث	outcrops	منكشفات
bedding	تطبق	plume	بلوم
bedrock	صخر الأساس	pluton	بلوتون
chemical and biochemical sediments	رواسب كيميائية حيوية	plutonic rocks	صخور بلوتونية (سحيقة)
clastic sediments	رواسب فتاتية	pyroclasts	فتات نارى
contact metamorphism	تحول تماسى	regional metamorphism	تحول اقليمي
country rock	صخر الإقليم (صخر المنطقة)	regolith	حطام صخرى (أديم)
crystallization	تبلور	rock cycle	دورة الصخور
dyke	قاطع	sediment	راسب
erosion	تعرية	sedimentary rocks	صخور رسوبية
extrusive igneous rocks	صخور نارية منبثقة	sill	جدة موازية
igneous rocks	صخور نارية	subsidence	هبوط
intrusive igneous rocks	صخور نارية متداخلة	texture	نسيج
foliation	تورق	volcanic rocks	صخور بركانية
lava	لابة	volcanism	تبركن
lithification	تصخر	weathering	تجوية
magma	صهارة		
metamorphic rocks	صخور متحولة		
orogeny	تجبل (نشأة الجبال)		

الأسئلة

1. ما الفرق بين الصخور النارية المنبثقة والمتداخلة؟
2. ما الفرق بين التحول الإقليمي والتحول التماسي؟
3. ما الفرق بين الصخور الرسوبية الفتاتية والصخور الرسوبية الكيميائية أو الكيميائية الحيوية ؟
4. اذكر ثلاثة معادن سيليكاتية تتواجد فى كل من الصخور النارية والرسوبية والمتحولة .
5. اذكر أيًا من الأنواع الثلاثة الرئيسية للصخور يتكون عند سطح الأرض ، وأيها يتكون فى باطنها.
6. ماالعمليات الجيولوجية التى تحول صخرًا رسوبيًّا إلى صخر نارى ؟
7. اذكر اسم معدن لا يتواجد سوى فى الصخور الرسوبية ، والذى يمكن استخدامه للتفريق بين صخر رسوبى دقيق التحبب تكوّن من الطين وصخر آخر بركانى .
8. هل تتوقع أن يكون نطاق التحول التماسى حول متداخل تكوّن بواسطة صهارة مرتفعة الحرارة جدا أكبر أم متداخل آخر نشأ من صهارة متوسطة درجة الحرارة ؟
9. كيف تشرح تكتونية الألواح النشاط البلوتونى؟

الفصل 4

الصخور النارية

I. تصنيف الصخور النارية :

أ- النسيج :

1 - الصخور النارية المتداخلة

2 - الصخور النارية المنبثقة (البركانية)

ب - التركيب الكيميائى والمعدنى :

1 - الصخور الفلسية

2 - الصخور المتوسطة

3 - الصخور المافية

4 - الصخور الفوقالمافية

II. كيف تتكون الصهارات؟ :

أ - كيف تنصهر الصخور؟

ب - تكوّن غرف الصهارة

III. التمايز الصهارى :

أ - سلسلة التفاعل المتصلة

ب - سلسلة التفاعل غير المتصلة

ج - التبلور التجزيئى

د - نظرية بوين للتمايز الصهارى

هـ - النظريات الحديثة منذ نظرية بوين

و - التمثل واختلاط الصهارات

IV. مواضع تكون الصهارات وأنواعها :

1- أصل الصهارة البازلتية

2 - أصل الصهارة الأنديزيتية

تتكون معظم الصخور النارية من معادن سيليكاتية تبلورت من الصهارة magma عند درجات حرارة تتراوح بين 700°م و 1200°م . وتعتبر الصخور النارية تسجيلا للتاريخ الحرارى للأرض ، بالإضافة إلى الدور المهم الذى يلعبه النشاط النارى فى نشأة وانتشار قيعان المحيطات ونشأة الجبال والقارات .

وقد أوضحت الدراسات الحديثة أن الصخور تنصهر فى بعض الأماكن العميقة الساخنة من القشرة الأرضية والوشاح ثم تندفع المواد المنصهرة نحو السطح . وقد تتصلب بعض الصهارات قبل أن تصل إلى السطح لتكون الصخور النارية المتداخلة ، بينما يخترق بعضها الآخر القشرة الأرضية ليتصلب فوق سطح الأرض ، ويكوّن الصخور النارية المنبثقة (البركانية) .

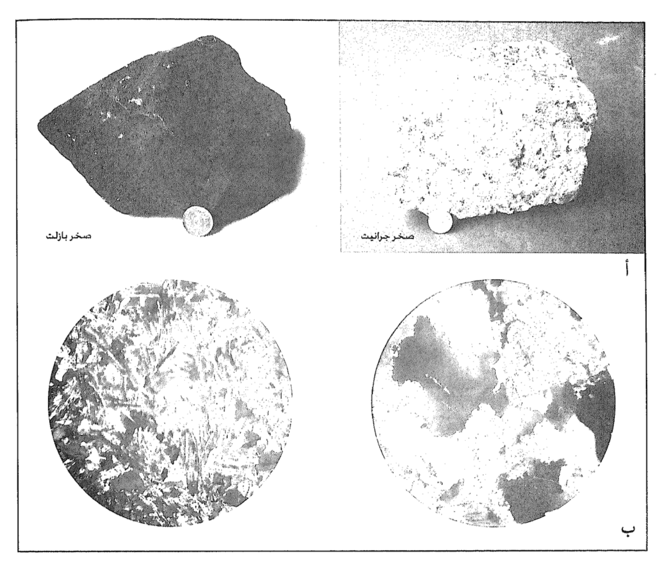
وقد تناولنا الصخور النارية فى الفصل السابق ، عند الحديث عن دورة الصخور، كما سنتناولها أيضا فى الفصل التالى أثناء مناقشتنا لنشاط البراكين وعلاقتها بالصهارات. وفى هذا الفصل سنتناول الصخور النارية من زاوية أكثر شمولا وتفصيلاً ، سواءً منها الصخور النارية المتداخلة intrusive igneous rocks أو المنبثقة extrusive igneous rocks ، وأيضا العمليات التى تؤدى إلى تكوّنها .

ا. تصنيف الصخور النارية

بدأ الجيولوجيون منذ نهاية القرن الثامن عشر فى دراسة الصخور النارية من خلال المشاهدات الحقلية، ومع بداية القرن التاسع عشر قاموا بإجراء الدراسات المعملية على تلك الصخور لتحديد تركيبها الكيميائى والمعدنى وتصنيفها ، متبعين نفس الطريقة التى نتبعها اليوم اعتمادا على خواص النسيج والتركيب المعدنى والكيميائى . وتعد الدراسة الحقلية أمرا مفيدا فى تصنيف الصخور النارية أحيانا.

أ. النسيج

صنفت الصخور النارية على أساس النسيج texture منذ نحو مائتى سنة مضت ، حيث يُعتبر النسيج وسيلة سهلة وعملية يستخدمها الجيولوجى فى الحقل والمعمل لتعرف أنواع الصخور المختلفة . وتعرف الهيئة الناتجة عن الحجم النسبى وشكل وطريقة ترتيب بلورات المعادن المكوّنة للصخر ، ودرجة التبلور crystallinity بالنسيج **texture** . وتقسم الصخور النارية حسب حجم البلورات إلى صخور خشنة التحبب coarse-grained rocks، مثل الجرانيت ، تحتوى على بلورات كبيرة الحجم ، يمكن رؤيتها بالعين المجردة ، عكس الصخور دقيقة التحبب fine- grained rocks ، مثل البازلت، التى تكون بلوراتها صغيرة جداً ، إلى الدرجة التى لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة أو حتى بالعدسة المكبرة. ويوضح شكل 1.4 عينتين من صخرى الجرانيت والبازلت مع صور أخذت باستخدام المجهر (الميكروسكوب) للقطاعات الرقيقة الشفافة التى تم عملها فى الصخرين ، وتعرف بالشرائح الميكروسكوبية thin sections . والفرق فى النسيج كان واضحا للجيولوجيين القدامى ، إلا أن تفسير طريقة تكوّن الأنسجة لم يتم إلا من خلال دراسة الصخور البركانية .



شكل (**1.4**): الفرق فى النسيج بين الصخور الخشنة التحبب مثل الجرانيت، والصخور الدقيقة التحبب مثل البازلت.
(أ) عينة لصخر الجرانيت (جرانيت أسوان – مصر) يحتوى على بلورات كبيرة الحجم يمكن رؤيتها بالعين المجردة، وعينة بازلت (الواحات البحرية – الصحراء الغربية – مصر) تحتوى على بلورات صغيرة الحجم.
(ب) صورة لقطاعات رقيقة شفافة فى الصخرين السابقين (سمك شريحة الصخر **0.03** مم حيث يمكن أن يتخللها الضوء)، قوة التكبير **O X 50**.

حيث لاحظ قدامى الجيولوجيين أن اللابة lava تبرد بسرعة عندما تنبثق فوق سطح الأرض وتكوّن صخرا دقيق التحبب أو صخرا زجاجيا لا يمكن تمييز أى بلورات فيه، بينما إذا بردت اللابة ببطء، كما يحدث فى فيض سميك من اللابة يبلغ ارتفاعه عدة أمتار، فإنه تتكون بلورات أكبر حجما وسط هذا الفيض السميك.

وقد أتى التوضيح الثانى لمفهوم النسيج فى القرن التاسع عشر من خلال الدراسة المعملية لعملية تبلور السوائل الشائعة. فعندما يبرد الماء إلى درجة التجمد، تتبلور جزيئاته وتأخذ أوضاعا ثابتة فى التركيب البنائى للبلورة المتصلبة، ولا تستطيع جزيئاته الحركة بحرية كما كانت تفعل عندما كان الماء سائلاً. وتتبلور كل السوائل الأخرى بهذه الطريقة. كما أوضحت تلك الدراسات أنه

إذا تصلب سائل بسرعة كبيرة ، كما يحدث للصهارة عندما تنبثق فوق سطح الأرض ، فإن البلورات لا تجد الوقت الكاف لكى تنمو لأحجام أكبر ، ويتكون بدلا من ذلك عدد كبير من البلورات الدقيقة ، بينما يعوق التبريد المفاجىء عملية تكون بلورات وتتكون نتيجة لذلك مادة زجاجية .

وقد استطاع الجيولوجيون الأوائل أن يربطوا العلاقة بين الأنسجة الدقيقة التبلور والتبريد السريع على سطح الأرض . كما عرفوا أن الصخور النارية الدقيقة التبلور دليل على تكونها من نشاط بركانى سابق . أما الصخور الخشنة التحبب ، وفى ظل غياب المشاهدة المباشرة ، فقد افتقد الجيولوجيون الدليل على طريقة تكونها .

وقد كان صخر الجرانيت هو الدليل على التبريد البطىء وتكون الصخور الخشنة التحبب، حيث لاحظ جيمس هاتون وهو أحد مؤسسى علم الجيولوجيا الحديثة فى أواخر القرن الثامن عشر ، وأثناء عمله فى الحقل فى اسكتلندا :

- أن صخور الجرانيت تقطع بعض طبقات الصخور الرسوبية .
- أن صخور الجرانيت تستطيع تهشيم الصخور الرسوبية، كما لو أنها قد اندفعت بقوة فى شقوقها على هيئة صهير سائل .
- تختلف معادن الصخور الرسوبية الملامسة للصخور الجرانيتية عن الصخور الرسوبية الموجودة على مسافة أبعد من الجرانيت.

ولذلك فقد توصل هاتون إلى أن التغيرات فى الصخور الرسوبية الملامسة للجرانيت لابد أنها نتجت عن حرارة شديدة انبثقت من الجرانيت . كما لاحظ أن الجرانيت يتكون من بلورات متداخلة وخشنة التحبب . كما توصل الكيميائيون أيضا إلى أن عملية التبلور البطيء تنتج هذا النموذج من البلورات.

وبتقييم هذه الأدلة الثلاثة ، اقترح هاتون أن الجرانيت قد تكون من مادة منصهرة ساخنة تبلورت فى أعماق الأرض . وقد توصل الجيولوجيون عند رؤية هذا النسيج المميز للجرانيت فى أماكن أخرى من العالم إلى النتيجة نفسها ، وهى أن الجرانيت والصخور الخشنة التبلور coarse-grained rocks المماثلة تكونت من صهارة بردت ببطء فى أعماق الأرض.

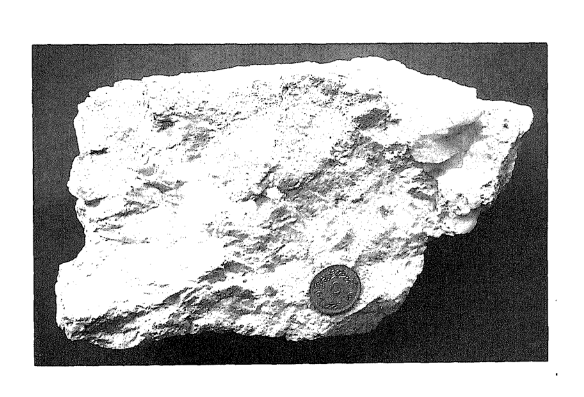
وكما سبق أن أوضحنا فى الفصل الثالث ، فإن الصهارات عبارة عن سوائل معقدة لمواد صخرية منصهرة. وتتبلور هذه السوائل نتيجة انخفاض درجة الحرارة أو التغيرات فى الضغط أو تغيرات فى التركيب الكيميائى . أما إذا بردت الصهارات بسرعة كبيرة ، فإنها تتصلب دون تكوين بلورات . ويشمل الناتج النهائى لعملية التبلور أو التصلب صخرا مكوّنا من بلورات متشابكة (معشقة) interlocking crystals أو **زجاج glass** . وعندما تتفتت الصهارة نتيجة ثورات (تدفق) انفجارى وهروب الغازات ، فقد تتجمع كسرات من الزجاج أو البلورات أو الصخور لتكوّن راسبا من الفتات النارى pyroclasts . وعندما يتحجر الفتات النارى فإنه يكون صخرا . وبغض النظر عن هذا التاريخ ، فإنه يتكون صخر نارى جديد يتكون من الزجاج أو البلورات أو أجزاء من الزجاج و البلورات والصخور .

وتعرف أنسجه الصخور النارية المكوّنة من بلورات متشابكة بأنها أنسجة متبلورة crystalline textures ، بينما تعرف أنسجة الصخور المكوّنة من كسرات بلورية أو صخرية بالأنسجة الفتاتية النارية pyroclastic textures. وتوصف الصخور النارية حسب درجة تبلور crystallinity المعادن المكوّنة لها بواحد من ثلاثة

مـــصطلحات: فهـــى إمـــا كاملـــة التبلـــور holocrystalline إذا تكونت كلية من مادة متبلورة، أو كاملة الزجاجية holohyaline إذا تكونـت كلية من الزجاج، أو ناقـصة التبلـور hypocrystalline إذا احتوت على بلورات وزجاج معا .

أما بالنسبة لحجـم الحبيبـات ، فيوصـف نـسيج الـصخر الـذى لا يحتـوى عـلى مـواد متبلـورة بأنـه زجاجى glassy النسيج ، وتـسمى المـواد المتبلـورة التى تكون حبيباتها صغيرة (أقل من 2 مم)، بحيـث يـستخدم الميكروسـكوب لتمييزهـا ، بأنهـا خفيـة التحبب aphanitic ، أما المواد المتبلورة التى يمكـن تمييـز بلوراتها بـالعين المجـردة (أكـبر مـن 2 مـم) فتوصـــف بأنهـــا ذات نـــسيج واضـــح التبلـــور phaneritic. وتصنف كـل الـصخور الناريـة ذات النـسيج واضـح التبلـور إلى دقيقـة التحبـب -fine grained عندما يكون حجـم الحبيبـات أقـل مـن 1مـم، ومتوسـطة التحبـب medium-grained عنـدما يكـون حجـم الحبيبـات بـين 1 مـم و 5 مـم ، وخـشنة التحبـب coarse-grained عندما يكون حجـم الحبيبات بين 5مم و 3 سم .

كـما أن هنـاك بعـض المـصطلحات الإضـافية التـى تستخدم لوصف صخور ذات حجم مميز ، فمثلا توصـف الصخور التى يزيد فيها حجم الحبيبات عن 3 سـم طـولا بأنها خـشنة التحبـب جـدًّا very coarse-grained أو بجماتيتية pegmatitic (شكل 2.4) . وعلى الرغم من أن كثـيرا مـن الجيولـوجيين يفـضلون اسـتخدام مـصطلح بجماتيـت للـصخور الـسيليكية (الجرانيتيـة) ذات حجـم البلورات الخشن جدا ، فإن هـذا المـصطلح قـد يـستخدم لأى صخر تكون بلوراته كبيرة بغـض النظـر عـن تركيبـه المعدنى.



شكل (**2.4**) : بجماتيت يتميز أن حجم الحبيبات فيه يزيد عن 3 سم طولاً – الصحراء الشرقية – مصر .

وتعرف الأنسجة البورفيرية porphyritic (شكلى 3.4هـ و 5.5) بأنها أنسجه تتكون من بلورات كبيرة الحجم فى أرضية groundmass من حبيبات أصغر أو فى وسط زجاجى . وتسمى البلورات الكبيرة بالبلورات الظاهرة (فينوكريست) phenocrysts، وهى البلورات التى تكونت أثناء وجود الصهارة تحت سطح الأرض ، ثم حدث الانفجار البركانى قبل أن تتمكن بقية البلورات المكوّنة للأرضية من النمو. وعند انبثاق الصهارة إلى سطح الأرض ، فإن اللابة تبرد بسرعة وتتحول إلى كتلة متبلورة من بلورات ظاهرة وكبيرة الحجم فى أرضية دقيقة التحبب.

ويمكن تقسيم الصخور النارية بناءً على نسيج الصخر أو طريقة التكوين والتواجد فى القشرة الأرضية إلى قسمين رئيسيين ، هما : الصخور النارية المتداخلة والصخور النارية المنبثقة.

1- الصخور النارية المتداخلة

يرتبط نسيج الصخر بسرعة تبرد الصهارة التى نشأ منها ، وبالتالى مكان تبريده. فالتبريد البطىء للصهارة فى باطن الأرض يسمح بالوقت الكافى لنمو بلورات كبيرة متداخلة ، والتى تميز **الصخور النارية المتداخلة intrusive igneous rocks** ، والتى تعرف أيضا بالصخور البلوتونية (الجوفية) plutonic rocks. والصخر النارى المتداخل هو صخر نارى اندفع بقوة فى الصخور المحيطة. كما تعرف الصخور المحيطة **بصخور المنطقة أو صخور الإقليم country rocks** .

2- الصخور النارية المنبثقة (البركانية)

يؤدى التبريد السريع عند سطح الأرض إلى تكوّن النسيج دقيق التحبب أو الزجاجى والمميز للصخور النارية المنبثقة **extrusive igneous rocks** . وتتكون هذه الصخور حينما تنبثق اللابة ، أو أى مواد بركانية أخرى من البراكين. لذلك تسمى هذه الصخور أيضا **بالصخور البركانية volcanic rocks**. وتضم الصخور النارية المنبثقة قسمين رئيسيين هما:

اللابات Lavas: وهى صخور بركانية تكونت من اللابة . ويستخدم مصطلح لابة lava للدلالة على كل من الصهارة التى تنبثق فوق سطح الأرض ، وأيضا على الصخر الذى تصلد منها ، وتتراوح هيئتها بين الناعمة smooth والجبليةropy والحادة المسننة jagged والشائكةspiky . ومن المعروف الآن أن عديدًا من هذه الأنسجة الخاصة تعتبر أدلة على الظروف التى تكونت فيها هذه الصخور ، والتركيب الكيميائى للصهارة التى تكونت منها ، والطريقة التى قذفت بها من البراكين .

الصخور الفتاتية النارية pyroclastic rocks: تتكون الصخور الفتاتية النارية أثناء الانفجارات الأكثر عنفا ، وذلك حينما تندفع قطع مكسرة من اللابة والبلورات والزجاج عاليا فى الهواء. ويضم **الفتات النارى pyroclasts** البلورات التى بدأت فى التكون قبل عملية الانفجار وكسرات من لابة تصلدت سابقا ، بالإضافة لقطع من الزجاج بردت وتكسرت أثناء عملية الانفجار. ويعتبر **الرماد البركانى volcanic ash** أصغر أنواع الفتات النارى حجما ، وهو يتكون من حبيبات متناهية فى الصغر، تتكون عادة من الزجاج الذى تكوّن عند اندفاع الغازات الهاربة من البركان فى صورة رذاذ دقيق الحبيبات من الصهارة . ويتراكم الرماد البركانى على هيئة طبقات مفككة وغير متلاحمة. وتعرف أحيانا الرواسب المتكوّنة من الفتات النارى باسم تفرا tephra . وتسمى كل الصخور البركانية المتكوّنة من هذه المواد الفتاتية النارية **بالصخور الفتاتية النارية pyroclastic rocks**.

وعندما يكون الزجاج هو المادة الوحيدة المكوّنة للصخر النارى ، فإنه يأخذ عدة أشكال منها البيوميس (الحجر الخفاف) **pumice** ، وهو عبارة عن كتلة خفيفة بها عديد من الفجوات vesicles أو الثقوب التى نتجت عن هروب الغازات المحبوسة من الصهير المتصلب. ومنها أيضا الأوبسيديان **obsidian** وهو عكس البيوميس ، حيث لا يحتوى على أى فجوات نتيجة هروب الغازات ، ولذلك يكون صلبا وكثيفا ، ويتميز بمكسره المحارى ، كما يتميز الأوبسيديان المكسور بحوافه الحادة ، ولذلك فقد استخدمه سكان أمريكا الأصليون كرؤوس للحراب وأدوات للقطع . وسنتناول فى الفصل الخامس كيفية تكوّن هذه الصخور والصخور البركانية الأخرى بالتفصيل . وسنتناول فيما يلى طريقة أخرى لتصنيف الصخور النارية.

تصنيفها على أساس النسيج أو التركيب المعدنى ، يمكن تصنيفها اعتمادا على التحليل الكيميائى . ويعتمد أحد التصنيفات الكيميائية البسيطة للصخور النارية على محتوى الصخور من السيليكا (SiO_2)، حيث تتراوح نسبة السيليكا فى معظم الصخور النارية بين 40 و 80 ٪ وزنا . وتقسم الصخور النارية حسب نسبة السيليكا التى يحتويها الصخر إلى أربع مجموعات هى: الصخور الحامضية acidic rocks ، والصخور المتوسطة intermediate rocks ، والصخور القاعدية basic rocks ، والصخور فوقالقاعدية ultramafic rocks (جدول 1.4).

كما تقسم الصخور النارية أيضا حسب نسبة محتواها من المعادن السيليكاتية ، اعتمادا على آلاف التحليلات المعدنية التى أجريت فى مختلف أنحاء العالم . وتقسم المعادن السيليكاتية إلى مجموعتين ، أولاهما مجموعة المعادن الفلسية felsic minerals الغنية بالسيليكا ، وتشمل الكوارتز والفلسبار (بنوعيه الأرثوكليز

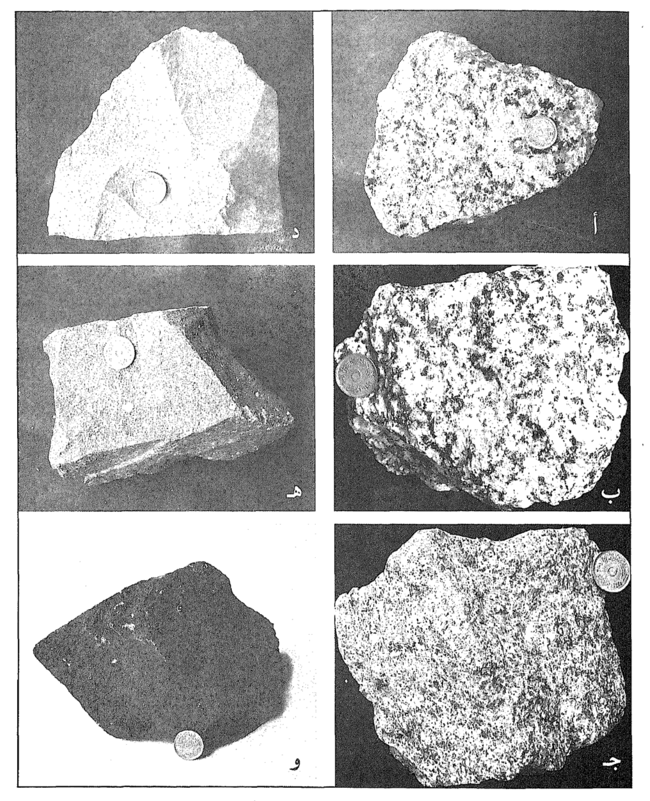
جدول (**1.4**): تقسيم الصخور النارية حسب نسبة السيليكا

نسبة السيليكا بالوزن **SiO_2 (wt%)**	اسم المجموعة	الصخور المتبلورة فى المجموعة
> ٪66	صخور حامضية Acidic rocks	ريوليت، جرانيت ، جرانوديوريت ، داسيت
٪66-٪52	صخور متوسطة Intermediate rocks	أنديزيت ، كوارتز ديوريت
45%-52%	صخور قاعدية Basic rocks	بازلت ، جابرو
<٪45	صخور فوقالقاعدية Ultramafic rocks	دونيت ، بريدوتيت

والبلاجيوكليز) ، وثانيتهما مجموعة المعادن المافية الفقيرة فى السيليكا mafic minerals ، وتشمل مجموعات الأمفيبول والبيروكسين والأوليفين والميكا الداكنة (بيوتيت) . وتتبلور المعادن المافية عند درجات حرارة أعلى من تلك التى تتبلور عندها المعادن الفلسية. وبالتالى تكون المعادن المافية أسبق فى

ب . التركيب الكيميائى والمعدنى

يمكن تصنيف الصخور النارية على أساس التركيب الكيميائى والمعدنى ، بالإضافة إلى النسيج . فالزجاج البركانى والذى يكون عديم التبلور تحت المجهر (الميكروسكوب) ، وكذلك الصخور ذات الحبيبات المتناهية الصغر أو الدقيقة التحبب ، والتى يصعب

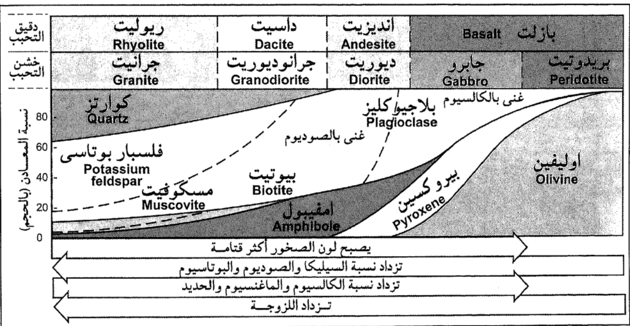


شكل (**3.4**) : صخور نارية متداخلة **intrusive rocks** خشنة التبلور (يمين الشكل) وأخرى منبثقة **extrusive rocks** دقيقة التبلور (يسار الشكل). لاحظ الفرق فى حجم الحبيبات بين مجموعة الصخور المتداخلة ومجموعة الصخور المنبثقة ، كما يلاحظ التغير فى اللون من الجرانيت (أ) والريوليت (د) وهى صخور فاتحة اللون لغناها بالكوارتز والفلسبار ، إلى الديوريت (ب) والأنديزيت (هـ) ، وهى صخور متوسطة اللون إلى الجابرو (جـ) والبازلت (و) ، وهى صخور خالية من الكوارتز وغنية بالبيروكسين والأوليفين ، ولذا فهى ذات لون داكن .

التبلور من المعادن الفلسية عندما تبرد الصهارة . ويمكن استخدام صفات فلسى felsic (من feldspar و silica)، ومافى mafic (من magnesium و ferric من الكلمة اللاتينية ferrum ، بمعنى حديد) لكل من المعادن والصخور الغنية فى هذه المعادن .

وقد أظهرت دراسة التركيب المعدنى والكيميائى للصخور النارية ، أن بعض هذه الصخور المنبثقة والمتداخلة تكون متماثلة فى التركيب ومختلفة فقط فى النسيج . فمثلا ، البازلت صخر منبثق تكون من لابة ، وللجابرو التركيب المعدنى نفسه للبازلت ، إلا أنه تبلور فى أعماق القشرة الأرضية. وبالمثل صخرا الديوريت والأنديزيت ، وكذلك الريوليت والجرانيت اللذان يتشابهان فى التركيب ويختلفان فى النسيج (شكل3.4) . وهكذا ، تكوّن الصخور المنبثقة والمتداخلة مجموعتين من الصخور النارية متقابلتين ومتوازيتين فى التركيب المعدنى والكيميائى، ولكن يختلفان فى النسيج . وبمعنى آخر ، فإن التركيب المعدنى والكيميائى فى معظم الصخور إما أن يكون لصخر متداخل وإما لصخر انبثاقى (بركانى) . والاستثناء الوحيد لذلك يكون فى الصخور عالية المافية جدا (فوقمافية ultramafic) ، مثل صخور الدونيت والبريدوتيت ، والتى نادراً ما تظهر على هيئة صخور نارية منبثقة .

وتتكون معظم الصخور النارية الشائعة من واحد أو أكثر من معادن السيليكات الستة التالية وهى : الكوارتز والفلسبار (وتضم المجموعة كلا من الفلسبار البوتاسى والبلاجيوكليز) ، والميكا (وتضم كلا من المسكوفيت والبيوتيت) ، والأمفيبول والبيروكسين والأوليفين. ويوضح شكل (4.4) تصنيف الصخور النارية على أساس المعادن التى تكوّن الصخر ونسبتها



شكل (**4.4**): تقسيم الصخور النارية على أساس المعادن التى تكوّن الصخر وتسبتها . يلاحظ أن الحدود بين أنواع الصخور متدرجة وليست فجائية ، كما هو موضح بالخطوط المشرطة فى الجزء العلوى من الشكل . ولمعرفة تركيب أى صخر ، تمد الخطوط المشرطة رأسيا لأسفل ثم تقدر نسبة المعادن باستخدام الأرقام الموضحة عند المحور الرأسى . وتسمى الصخور النارية الغنية فى الكوارتز والفلسبار بالفلسية الفلسية **Felsic** وتكون فاتحة اللون بينما تسمى الصخور النارية الغنية فى البيروكسين والأمفيبول والأوليفين بالصخور النارية المافية **mafic igneous rocks** وتكون داكنة اللون .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

بمجرد تعيين نسيج الصخر . ويمثل المحور الأفقى لشكل (4.4) نسبة السيليكا بالإضافة لتغير لون الصخر بسبب تغير محتوى الصخر من المعادن المافية والمعادن الفلسية. كما يمثل المحور الرأسى لهذا الشكل نسبة تلك المعادن فى الصخر . وعندما تقدر نسبة كل معدن فى عينة صخرية ما ، فإنه يمكن تحديد الوضع الصحيح للصخر على الشكل المذكور ، وبالتالى اسم الصخر المقابل من معرفة نسيج الصخر . فمثلا عند تسمية عينة صخرية تتكون من 30 ٪ أوليفين و 30 ٪ بيروكسين و 40 ٪ بلاجيوكليز يتم حساب موضع النقطة على الشكل المذكور. فنرسم خطا أفقيا عند النسبة 30 ٪ فيتقاطع الخط مع المنحنى الذى يفصل الأوليفين عن البيروكسين . فإذا رسمنا خط رأسيا من نقطة التقاطع فإنه يقطع المنحنى بين البيروكسين والبلاجيوكليز عند نقطة قريبة من نسبة 60 ٪ ، وهى نسبة تساوى مجموع نسبتى الأوليفين والبيروكسين ، بينما تمثل النسبة الباقية (40٪) نسبة البلاجيوكليز . فإذا كان نسيج تلك العينة الصخرية خشن التحبب كان الصخر جابرو . أما إذا كان النسيج دقيق التحبب كان الصخر بازلت .

وجدير بالذكر أن الصخور على يسار الشكل السابق تكون فاتحة اللون ، بينما تكون تلك التى على يمينه داكنة اللون ، ويقع بينهما الصخور متوسطة اللون . وقد تم رسم الخط بين الديوريت والجابرو عند الحد الذى تصل فيه نسبة المعادن الداكنة 50 ٪ من مجموع المعادن المكوّنة للصخور ، وتزيد عن نسبة الفلسبارات فاتحة اللون .

1 - الصخور الفلسية

الصخور الفلسية **felsic rocks** هى صخور نارية فاتحة اللون فقيرة فى الحديد والماغنسيوم وغنية بالمعادن التى تحتوى على نسبة عالية من السيليكا مثل الكوارتز وفلسبار الأرثوكليز وفلسبار البلاجيوكليز. وتحتوى معادن فلسبار البلاجيوكليز على كل من عنصرى الكالسيوم والصوديوم . وكما يوضح شكل (4.4) ، فالصخور الفلسية تكون أغنى فى البلاجيوكليز الصودى بينما تكون الصخور المافية أغنى فى البلاجيوكليز الكلسى . وإذا أخذنا فى الاعتبار ما سبق ذكره ، من أن المعادن المافية تتبلور عند درجات حرارة أعلى من تلك التى تتبلور عندها الصخور الفلسية ، فإن البلاجيوكليز الغنى بالكالسيوم يتبلور عند درجات حرارة أعلى من تلك التى يتبلور عندها البلاجيوكليز الغنى بالصوديوم.

ويعتبر صخر الجرانيت **granite** أكثر الصخور النارية المتداخلة المعروفة انتشارا . وهو صخر فلسى فاتح اللون يحتوى على نحو 70٪ سيليكا. كما يحتوى على كوارتز وفلسبار الأرثوكليز بوفرة ، وعلى كميات أقل من فلسبار البلاجيوكليز (انظر الحد الأيسر من شكل 4.4) ، وتعطى تلك المعادن الفلسية فاتحة اللون الجرانيت لونه الأحمر الوردى أو الرمادى . كما يحتوى الجرانيت على كميات محدودة من معادن المسكوفيت والبيوتيت والأمفيبول.

وصخر الريوليت **rhyolite** هو المقابل البركانى للجرانيت . ويشارك هذا الصخر ذو اللون البنى الفاتح إلى رمادى ، صخر الجرانيت تركيبه المعدنى الفلسى واللون الفاتح ، إلا أنه دقيق التحبب جدا. ويحتوى عديد من صخور الريوليت على نسبة كبيرة من الزجاج البركانى، أو قد تتكون منه كلية.

2 - الصخور النارية المتوسطة

تقع الصخور النارية المتوسطة **intermediate igneous rocks** فى منتصف المسافة بين الحدين الفلسى والمافى. وكما يشير اسمها ، فإن هذه الصخور

ليست غنية فى السيليكا مثل الصخور الفلسية ، ولا هى فقيرة فيها مثل الصخور المافية . وتوجد الصخور النارية المتوسطة على يمين صخر الجرانيت فى شكل (4.4) . وأول الصخور المتوسطة هو صخر **الجرانوديوريت granodiorite** ، وهو صخر فلسى فاتح اللون يشبه إلى حد ما صخر الجرانيت ، وهو يماثل الجرانيت فى احتوائه على نسبة وفيرة من الكوارتز ، وفلسبار البلاجيوكليز هو الأكثر شيوعا فى الصخر عن فلسبار الأرثوكليز. ونجد على يمين صخر الجرانوديوريت صخر **الديوريت diorite**، وهو أقل فى نسبة السيليكا من الصخور السابقة ، ويتميز بسيادة فلسبار البلاجيوكليز مع قليل من الكوارتز أو حتى اختفائه . وتحتوى صخور الديوريت على نسبة متوسطة من المعادن المافية مثل البيوتيت والأمفيبول والبيروكسين . وبالتالى تميل صخور الديوريت لأن تكون أغمق لونا عن الجرانيت أو الجرانوديوريت . والمقابل البركانى للجرانوديوريت هو صخر **الداسيت dacite** . ويقع إلى يمين الداسيت فى السلسلة البركانية صخر **الأنديزيت andesite** ، وهو المقابل البركانى لصخر الديوريت. وقد اشتق اسم صخر الأنديزيت من جبال الأنديز Andes ، وهى سلاسل جبال بركانية فى أمريكا الجنوبية.

3 - الصخور المافية

تتميز **الصخور المافية mafic rocks** بأنها تحتوى على نسبة عالية من البيروكسين والأوليفين ، وهى معادن فقيرة نسبيا فى السيليكا ، وغنية فى عنصرى الحديد والماغنسيوم اللذان تستمد منهما المعادن المافية لونها الداكن المميز. وتتواجد الصخور المافية فى شكل (4.4) على يمين الصخور المتوسطة ، حيث نجد صخر **الجابرو gabbro** ، وهو صخر متداخل خشن التحبب، له لون رمادى غامق . ويتميز الجابرو بوفرة المعادن المافية ، خاصة البيروكسين، وهو لا يحتوى على كوارتز ، وإنما على كميات متوسطة من فلسبار البلاجيوكليز الغنى بالكالسيوم.

أما **البازلت basalt** فهو صخر ذو لون رمادى داكن إلى أسود ، وهو الصخر البركانى دقيق التحبب المقابل للجابرو. والبازلت أكثر الصخور النارية انتشارا فى القشرة الأرضية . ويكوّن البازلت قيعان المحيطات تحت الطبقة الرقيقة من الصخور الرسوبية التى تغطى قيعان المحيطات . كما تنتشر على القارات فرش سميكة sheets من البازلت تكوّن هضابا عالية فى بعض المناطق (مثل هضبة الدكن فى الهند والفرش البازلتية فى الدرع العربى بالمملكة العربية السعودية والمعروفة بالحرات) (شكل 2.5) ، بالإضافة إلى تواجده على هيئة جدد موازية sills وقواطع dikes .

4 - الصخور فوقالمافية

تتكون **الصخور فوقالمافية ultramafic rocks** أساسا من المعادن المافية التى تحتوى على نسبة عالية من الحديد والماغنسيوم ، بالإضافة للفلسبار بنسبة أقل من 10 ٪. ونجد عند هذا المستوى المنخفض جداً من السيليكا (نحو 45٪) صخر **البريدوتيت peridotite** وهو صخر بلوتونى خشن التحبب ، لونه رمادى مخضر داكن ، يتكون أساساً من الأوليفين ، مع كمية صغيرة من البيروكسين والأمفيبول . ونادرا ما نجد صخورا فوقمافية كصخور منبثقة ، حيث إن البريدوتيت يتكون نتيجة تجمع بلورات من الصهارة لا تحتوى على أية سوائل . ولذلك لا تكوّن الصهارة فوقالمافية لابات.

ويتضح مما سبق أن الصخور النارية يمكن تصنيفها على أساس تركيبها المعدنى والكيميائى ، بالإضافة إلى

النسيج . ويمكن تفسير التاريخ الجيولوجى لهذه المجموعات المصنفة على أساس التركيب المعدنى بمقارنة التركيب المعدنى ودرجة حرارة التبلور. وكما يوضح شكل (4.4) أن المعادن المافية تتبلور عند درجات حرارة أعلى من تلك التى تتبلور عندها المعادن الفلسية . وبالتالى تعكس الزيادة فى درجات حرارة التبلور ، درجات الحرارة التى تنصهر عندها الصخور. وعندما نتحرك من المجموعة المافية إلى الصخور الفلسية فإن محتوى السيليكا يزداد أيضاً. وتعكس زيادة محتوى السيليكا زيادة التعقيد فى البنية البلورية لمعادن السيليكات . وهناك علاقة عكسية بين زيادة تعقيد البنية البلورية للمعادن السيليكاتية ، وقدرة الصخر المنصهر على الانسياب . فكلما زادت درجة تعقيد البنية البلورية ، قلت قدرة الصخر على الانسياب . وهكذا فإن اللزوجة **viscosity** – وهى قياس لمقاومة السوائل للانسياب – تزداد بزيادة محتوى السيليكا (شكل 4.4) . وتعتبر اللزوجة عاملا مهما فى سلوك اللابة ، كما سنرى فى الفصل الخامس .

ولقد أصبح واضحا أن معرفة المعادن المكونة للصخر تقدم معلومات مهمة عن الظروف التى تكونت فيها الصهارة الأصلية وتبلورها . ولتفسير هذه المعلومات بدقة ، فإننا يجب أن نفهم العلميات التى تؤدى إلى تكوّن الصهارة ، وهو ما سنناقشه فيما يلى :

II. كيف تتكوّن الصهارات؟

الصهارة **magma** هى مواد صخرية منصهرة تشتمل على كل الحبيبات المعدنية العالقة والغازات الذائبة . وتتكون الصهارة حينما ترتفع درجات الحرارة بدرجة تكفى لصهر صخور القشرة crust أو الوشاح mantle . وتصل الصهارة إلى سطح الأرض عن طريق البراكين . ويمكن استنتاج ثلاث خصائص مهمة للصهارة من خلال مشاهدة تدفق اللابة:

1. تتميز الصهارة بأنها تتكون فى معظمها من السيليكا SiO_2 .
2. تتميز الصهارة بارتفاع درجة حرارتها .
3. تتميز الصهارة بقدرتها على الحركة وقابليتها للتدفق flow والانبثاق extrusion. وهذا صحيح بالرغم من أن بعض الصهارات تكاد تكون صلبة . وتكون معظم الصهارة عبارة عن خليط من البلورات والسوائل (ويشار إليها باسم صهير melt).

وتدل طريقة انتقال الموجات الزلزالية فى الأرض ، على أن معظم مكونات الأرض تكون صلبة حتى عمق آلاف الكيلومترات، والتى تمتد حتى حدود لب الأرض . بينما تدل الانبثاقات البركانية على أنه لابد من وجود مناطق تنصهر فيها الصخور لتنشأ الصهارات المختلفة . فكيف يمكن حل هذا التناقض ؟. وتكمن الإجابة عن هذا السؤال فى العمليات التى تؤدى إلى انصهار الصخور ونشأة الصهارات .

وعلى الرغم من أنه يمكننا مشاهدة الانبثاقات البركانية (اللابات) فى الطبيعة، ودراسة الفتات البركانى فى المعامل ، إلا أن معظم عمليات تكوين الصخور النارية لا يمكن مشاهدتها مباشرة. وتعتمد دراسة الصهارات أساسا وعمليات تكون الصخور النارية على الاستدلال الجيولوجى والمحاكاة المعملية . فعلى سبيل المثال ، لنعرف أين تنصهر الصخور فى الأرض، فلا بد لنا أن نعرف الظروف التى ينصهر فيها

العديد من الصخور والأماكن الموجودة بالأرض والتى تتواجد بها هذه الظروف .

أ. كيف تنصهر الصخور؟

لقــد أفــادت التجــارب المعمليــة كثــيرا فى فهــم ميكانيكية انصهار وتصلب الصخور . فنحن نعرف من هذه التجارب أن نقطة انـصهار الـصخور تعتمـد عـلى التركيب المعدنى والكيميائى للـصخر وعـلى الظـروف السائدة من الحرارة والضغط.

الحرارة والانصهار: أوضـحت التجـارب فى بدايـة القرن العشرين أن الصخر المتكوّن من عدد من المعـادن لا ينصهر تماما عنـد درجـة حـرارة مـا . ويحـدث هـذا **الانــصهار الجزئــى partial melting** لأن المعـادن المكوّنة للصخر تنـصهر عنـد درجـات حـرارة مختلفـة. فعندما ترتفع درجـة الحـرارة ، تنـصهر بعـض المعـادن ويبقـى بعـضها الآخـر صـلبا. فـإذا توقفـت عمليـة الانصهار، وظلت الظروف مستمرة عند درجة حـرارة ما ، فإن الانصهار يتوقف ، ويتبقى خليط مـن الـصخر الصلب والصهير. ويسمى جزء الصخر الـذى انـصهر عند درجـة حـرارة معينـة **بمـصهور جزئـى partial melt**. ويمكن تشبيه عملية الانصهار الجزئى بتسخين قطعة من الشيكولاتة بها راقات من البـسكويت ، فـإذا تـم التـسخين إلى الدرجـة التـى تنـصهر فيهـا قطعـة الــشيكولاتة ، فــإن الجــزء الأساســى مــن راقــات البسكويت يظل صلبا.

وتعتمد نسبة الجزء المنصهر فى الانصهار الجزئى على التركيب المعدنى للصخور ودرجـة انـصهارها ودرجـة الحرارة الموجودة فى القشرة الأرضية أو الوشاح ، حيث تحدث عملية الانصهار . فعند الحد الأدنـى مـن مـدى عملية الانصهار ، يجب ألا تقل نسبة الجزء المنصهر عن 1٪ من حجـم الـصخر الأصـلى . حيـث يظـل معظـم الصخر الساخن فى حالة صلبة بينما تتواجـد نـسبة مـن المصهور على هيئة قطرات صغيرة عـلى امتـداد الحـدود بين البلورات فى جميع أنحاء كتلة الصخر . وعلى سـبيل المثال ، تتراوح نسبة الصهير فى عديد مـن المـصهورات الجزئية لصهارات بازلتية فى أعلى الوشـاح بـين 1 و 2٪ فقط . وعند الحـد الأعـلى للحـرارة مـن مـدى عمليـة الانصهار ، فإن معظم الصخر يكون فى حالـة منـصهرة مع كميات أقل من بلورات غير منصهـرة بهـا . وهــذا ما يحدث عنـدما تتواجـد غرفـة صـهارة جرانيتيـة بهـا بلورات أسفل بركان .

وقد ساعد فهم عملية الانـصهار الجزئـى ، فى فهـم كيفية تكوّن أنواع مختلفـة مـن الـصهارة عنـد درجـات حرارة مختلفة فى أماكن مختلفة من باطن الأرض . فمـن السهل الآن فهم كيف أن تركيب مـصهور جزئـى مـن صخر يحتوى على معادن ذات درجـات انـصهار أقـل، يكون مختلفا بدرجة ملحوظة عن صخر تم صهره تماما. لذلك فإن الصهارات البازلتية التى تكونـت فى أمـاكن عديدة من الوشاح قد تختلف إلى حـد مـا فى التركيـب. ومن هذه المشاهدة ، فإنـه مـن المتوقـع أن الـصهارات المختلفة تأتى من نسب مختلفة من المصهور الجزئى.

الضغط والانصهار: يزداد الضغط كلـما زاد العمـق فى الأرض نتيجـة لزيـادة وزن الـصخور التـى تعلـوه. ولقــد أوضــحت التجـارب المعمليــة أنــه عنــد صــهر الصخور تحت ضغوط مختلفة ، فإن زيادة الضغط تؤدى إلى زيادة درجة الحرارة التـى ينـصهر عنـدها الـصخر. ولـذلك فإن الصخور التى تنصهر عند درجات حـرارة معينة عند سطح الأرض ، تظل فى الحالـة الـصلبة عنـد درجة الحرارة نفسها فى بـاطن الأرض بـسبب الـضغط المرتفع . فإذا انصهر صخر عند درجة حـرارة 1000°م

عند سطح الأرض ، فإن درجة حرارة الانصهار ربما تصل إلى 1300°م عند الأعماق فى باطن الأرض حيث يزداد الضغط آلاف المرات عنه عند سطح الأرض . ولذلك، فإن تأثير الضغط يفسر عدم انصهار الصخور فى معظم القشرة الأرضية والوشاح إلا حيث يسمح التركيب وكلٌّ من الضغط والحرارة بالانصهار.

الماء والانصهار: أظهر تحليل اللابات الموجودة فى الطبيعة وجود الماء فى بعض الصهارات. لذلك قام العلماء بإضافة كميات صغيرة من الماء إلى الصخور التى قاموا بصهرها ، حيث أدى ذلك إلى اكتشاف أن تركيبى المصهور الجزئى والمصهور الكامل لم يتغيرا بتغير درجات الحرارة والضغط فقط ، ولكن تغير أيضا من كمية الماء الموجودة أيضاً.ولنأخذ مثلاً تأثير محتوى الماء على معدن الألبيت وهو أحد معادن فلسبار البلاجيوكليز الغنى بالصوديوم ، وذلك عند الضغط المنخفض عند سطح الأرض . فإذا كان الماء موجوداً بكمية بسيطة ، فإن الألبيت النقى يظل فى الحالة الصلبة حتى درجات حرارة فوق 1000°م حيث يتواجد الماء فى الألبيت عند هذه الدرجات العالية من الحرارة فى صورة غاز. فإذا أضفنا الماء بكميات كبيرة ، فإن درجة حرارة انصهار الألبيت تنخفض إلى 800°م. ويتبع هذا السلوك القاعدة العامة التى تقول بأن إضافة مادة إلى مادة أخرى يؤدى إلى انخفاض درجة انصهار المحلول. وتلك القاعدة يمكن ملاحظتها فى المناطق الباردة حيث يتم رش الملح على الثلج المتجمع على الطرقات حتى تنخفض درجة انصهار الثلج.

وبالطريقة نفسها ، فإن درجة حرارة انصهار الألبيت وكل معادن السيليكات الأخرى تنخفض بشكل ملحوظ فى وجود كميات كبيرة من الماء ، حيث تتناسب درجات انصهار معادن السيليكات المختلفة مع كمية الماء المذابة فى السيليكات المصهورة. ومحتوى الماء عامل مهم فى انخفاض درجة حرارة انصهار مخلوط الصخور الرسوبية مع الصخور الأخرى ، حيث إن الصخور الرسوبية تحتوى على حجم كبير من الماء فى فراغاتها أكبر بكثير من تلك الموجودة فى الصخور النارية أو المتحولة .

ب - تكوّن غرف الصهارة

تكون كثافة معظم المواد أقل فى الحالة السائلة عنها فى الحالة الصلبة . فكثافة المواد الصخرية المنصهرة أقل من كثافة الصخر الصلب المماثل له فى التركيب - بمعنى أن وزن حجم معين من المصهور أقل من وزن نفس الحجم من الصخر الصلب . ولقد اقترح العلماء الطريقة التى تتكون بها الأجسام الكبيرة من الصهارة. فإذا أعطيت الفرصة للمصهور الأقل كثافة للتحرك فإنه سيتحرك لأعلى ، كما ينتقل البترول الأقل كثافة من الماء بأن يرتفع إلى السطح فى مخلوط من الماء والبترول . وحيث إن المصهور الجزئى يكون فى الحالة السائلة، فإنه يتحرك ببطء لأعلى على امتداد الحدود بين بلورات الصخور التى تعلوه. وتتحرك القطرات الساخنة لأعلى، لتلتحم مع بقية القطرات، لتكوّن تجمعًا كبيرًا من الصخر المنصهر داخل باطن الأرض الصلب.

ومن المعروف الآن أن التجمعات الكبيرة من الصخور المنصهرة تكوّن غرف الصهارة **magma chambers** - وهى تشبه كهوف كبيرة ممتلئة بالصهارة فى الغلاف الصخرى lithosphere . وتتكون من قطرات الصخر المنصهر الصاعدة وتندفع داخل الصخور الصلبة المحيطة . وقد تصل غرف

الصهارة لأحجام كبيرة قد تصل إلى عدة كيلومترات فى الحجم . وما تزال الطريقة التى تتكون بها غرف الصهارة ، وكذلك التحديد الدقيق لشكل غرف الصهارات فى الأبعاد الثلاثة موضع دراسة .

ويمكن تصور غرف الصهارة على أنها كهوف كبيرة ممتلئة بالصهير فى وسط من الصخور الصلبة ، حيث تتمدد نتيجة لإضافة المزيد من مصهور الصخور المحيطة أو السوائل التى تهاجر خلال الكسور والفتحات الصغيرة الأخرى بين البلورات. وتنكمش غرف الصهارة بعد اندفاع الصهارات إلى السطح عند الانبثاقات . ومن المسلم به الآن وجود غرف الصهارة، حيث تظهر الموجات الزلزالية عمقها وحجمها والحدود العامة لها أسفل البراكين النشطة .

III. التمايز الصهارى

لقد أوضحنا فيما سبق كيف تتكون الصهارات ، إلا أننا لم نعرف كيف تتكون الأنواع المختلفة من الصخور النارية . فهل تتكون هذه الصخور من صهارات مختلفة فى التركيب الكيميائى نتيجة انصهار أنواع مختلفة من الصخور؟. أم أن هناك عمليات أخرى تؤدى إلى تكون الأنواع المختلفة من الصخور من مادة واحدة أصلية متجانسة ؟. وقد تم الإجابة على هذه الأسئلة من النتائج التى تم التوصل إليها من الدراسات التى تمت على الصخور النارية فى أوائل القرن العشرين . حيث خلط العلماء عناصر كيميائية بنسب تحاكى تلك الموجودة فى الصخور النارية فى الطبيعة ، ثم قاموا بصهرها فى أفران ذات درجة حرارة عالية . وقد سجلت درجات الحرارة التى تتصلب عندها الصهارات وتتكون البلورات ، وكذلك التركيب الكيميائى لهذه البلورات . ولقد أدت هذه الدراسات إلى التوصل إلى نظرية التمايز الصهارى **magmatic differentiation** . ومفهوم هذه النظرية أن صخورا مختلفة فى التركيب تتكون من صهارة واحدة متجانسة تعرف بالصهارة الأم parent magma بالتمايز الصهارى، كما يحدث أحيانا انشقاق للصهير الأم إلى صهارات مختلفة تعرف بالصهارة المشتقة derivative magma . ويتكون من كل صهارة مشتقة نوع من الصخور النارية يختلف فى تركيبه عن الصهارة الأم . ويحدث التمايز الصهارى بسبب اختلاف درجة حرارة تبلور المعادن وكثافتها . ويتغير تركيب الصهارة أثناء عملية التبلور نتيجة نقص بعض العناصر الكيميائية التى استخدمت فى تكوين المعادن المتبلورة .

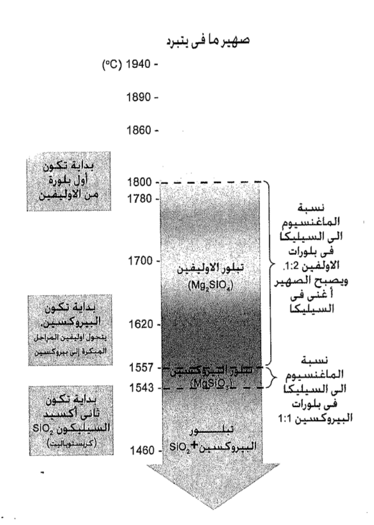
وبصورة مماثلة لعملية الانصهار الجزئى ، فإن أول المعادن المتبلورة من الصخور المنصهرة أثناء التبريد تكون هى آخرها فى الانصهار أثناء التسخين فى التجارب المعملية. وخلال هذه العملية من التبلور ، فإن التركيب الكيميائى للصهارة يتغير نتيجة دخول العناصر الكيميائية المختلفة فى تبلور المعادن . وأخيرا ، وعند درجة الحرارة التى يتم عندها تصلب الصهارة تماما ، فإن آخر المعادن المتبلورة هى أولها فى الانصهار عندما يتم تسخين الصخر. ولقد ظهر أثناء التجارب المعملية أن هناك نمطين للتبلور:

1. تغير مستمر وتدريجى . وفى هذا النموذج ، والذى يمثله فلسبار البلاجيوكليز ، يتغير التركيب الكيميائى للفلسبار المتكوّن تدريجيا أثناء تقدم عملية التبلور .
2. تغير فجائى ومنفصل . وفى هذا النموذج ، والذى يميز المعادن المافية مثل الأوليفين والبيروكسين ، تتغير البنية البلورية والتركيب الكيميائى للبلورات دون تواصل أثناء التبريد، حيث يتغير معدن ما فجأة إلى معدن آخر عند درجة حرارة معينة . ونظرا

لأن هذين النموذجين للتبلور أساسيان لفهم عملية التمايز الصهارى ، فإننا سنتناولها هنا بمزيد من التفصيل :

أ – سلسلة التفاعل المتصلة

عندما تبرد مصهورات محتوية على فلسبار بلاجيوكليز ذات تركيب كيميائى متنوع ، فإن أول البلورات المتكونة تكون دائماً أغنى فى الكالسيوم عن المصهور ، ويستنفد تكوين هذه البلورات الكالسيوم من المصهور جزئيا . ويصبح المصهور المتبقى أغنى فى الصوديوم . ونتيجة ذلك ، ومع استمرار تبريد المصهور، فإن البلورات التالية فى التكوين تزداد غنًى فى الصوديوم . وتتفاعل البلورات الغنية بالكالسيوم والمتكونة أولا مع المصهور الغنى فى الصوديوم . وفى هذا التفاعل ، فإن أيونات الصوديوم فى المصهور تحل محل أيونات الكالسيوم فى البلورة ، بحيث تصبح



شكل (**5.4**): جزء من سلسلة التفاعل غير المتصلة discontinuous reaction series . يحدث التتابع الموضح فى الشكل عندما يبرد صهير مكوّن من الماغنسيوم والسيليكا ، وتكوّن السيليكا نحو 50 ٪ من وزنه . وهذا يمثل جزءا من سلسلة التفاعل غير المتصلة التى يتبلور بواسطتها تتابع من المعادن المختلفة من صهير فى سلسلة تتغير فجأة . ولا يتبلور الأوليفين فى المراحل الأولى فى كل صهير عند 1800°م بالضبط ، حيث تعتمد درجة الحرارة على تركيب الصهير المتبرد .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

البلورات الغنية بالكالسيوم والمتكونة فى المرحلة المبكرة أغنى فى الصوديوم . وتكـون جميـع البلـورات ، سـواء المتكونة سابقا أو لاحقا لها جميعاً التركيـب الكيميـائى نفسه . ومع استمرار العملية ، يصبح كل من المـصهور والبلـورات أغنـى تـدريجياً فى الـصوديوم وأفقـر فى الكالسيوم . وعند اكتمال عملية التبلور ، تصبح الكتلـة النهائية الصلبة المتجانسة للبلورات لها تركيب المصهور الأصلى نفسه . ونلاحظ أنه فى كل المراحل ، فإن المعدن المتبلور كان دائما هو فلسبار البلاجيوكليز .

والفكرة الأساسية لهذه العملية هو التفاعل المستمر للبلـورات مـع المـصهور ، حيـث يحـدث تغـير بـسيط باستمرار ، بحيث إنه عند أى نقطة خلال التبلور ، فإن كل البلـورات يكـون لهـا التركيـب الكيميـائى نفـسه . وتتحـرك البلـورات والمـصهور خـلال سلـسلة مـن التراكيب ، تكون أغنى فى الكالسيوم فى المرحلة المبكرة، وأغنى فى الصوديوم فى المراحل اللاحقة . ومع استمرار عمليـة التبريـد ، تـستمر **سلـسلة التفاعـل المتـصلة continuous reaction series** فى التقدم حتـى تتم عملية التبلور.

ب - سلسلة التفاعل غير المتصلة

يتـضمن تبلـور المعـادن المافيـة مثـل الأوليفـين والبيروكسين والامفيبول وميكا البيوتيت عملية مختلفة إلى حد ما عن تبلور معادن البلاجيوكليز . فقد أظهرت التجارب أنه إذا بردت مصهورات تحتوى على مكونات المعادن المافية بشكل تدريجى ، وبطريقة مماثلة للتجارب التى أجريت على فلسبار البلاجيوكليز ، بحيـث يمكـن للبلورات أن تتفاعل مع المحلول ، فإن المعادن المتكونـة تبدى أيضا طريقة منتظمـة فى التبلـور. فعنـد 1800°م يتبلور الأوليفين ، ويستمر فى التبلور حتى تصل درجـة حـرارة المـصهور إلى 1557°م. وتحـت هـذه الدرجـة يتكون البيروكسين فجأة ، وهو معدن مختلف تماما عـن الأوليفـين ، وتتحـول كـل بلـورات معـدن الأوليفـين المتكونـة مبكـرا إلى البيروكـسين (شـكل 5.4). وعنـد 1543°م ، يبدأ معدن الكريستوباليت فى التكون ، وهو أحد معادن السيليكا المتكونة عند درجة الحرارة العالية، كما يستمر البيروكسين فى التبلـور حتـى يـتم التـصلب تماماً.

وفى بعـــض التجـارب الأخـرى ، وباسـتخدام مـصهورات ذات تركيـب كيميـائى مختلـف يتبلـور الأمفيبول أولاً ، ثم البيوتيت عند درجات حرارة أقـل من سلسلة الأوليفين – بيروكسين. وفى **سلسلة التفاعل غير المتصلة discontinuous reaction series** هذه يحدث تفاعل بين المصهور ومعادن لها تركيب محدد عند درجات حرارة معينه فقط لتكـوّن معـادن جديـدة مختلفة . وتختلف هـذه العمليـة عـن التطـور التـدريجى لفلسبار البلاجيوكليز والمصهور الأصلى حيـث يحـدث التفاعـل علـى مـدى مـستمر ومتـدرج مـن التركيـب ودرجات الحرارة.

والبنية البلورية لمعادن السلـسلتين التفـاعليتين هـى جـزء مـن الاختلافـات فى البنيـة البلوريـة لمعـادن السيليكات (شكل 14.2) . ويلاحظ أن البنية البلورية الأساسية للفلسبار فى سلـسلة التفاعـل المتـصلة تبقـى ثابتـة بـالرغم مـن تغـير نـسبة كـل مـن الكالـسيوم والصوديوم. وتتبلور معـادن البلاجيـوكليز فى فـصيلة الميـول الثلاثـة وتتميـز بتركيـب إطـارى يتكـون مـن رباعيات الأوجه السيليكاتية الممتدة فى الأبعـاد الثلاثـة (وفى الحقيقة فإن البنيات البلورية لمعادن البلاجيوكليز تكون معقدة وتتغير تبعا للتركيب الكيميـائى وظـروف التبلور ، ولكن لن نتناول تلك التغـيرات التفـصيلية فى

هذا الجزء من الكتاب) . وعلى العكس من ذلك ، تتغير البنيات البلورية لسلسلة التفاعل غير المتصلة بانخفاض درجة الحرارة ، مكونة تراكيب من رباعيات الأوجه السيليكاتية تزداد تعقيدا مع انخفاض درجة الحرارة . فعند أعلى درجات الحرارة ، تتكون البنية البلورية لمعادن الأوليفين من رباعيات الأوجه السيليكاتية المفردة ، وهي الوحدة البنائية الأساسية لمعادن السيليكات (انظر الفصل الثاني). وفي المرحلة التالية تتكون البيروكسينات من سلاسل مفردة من رباعيات الأوجه ثم تأتي الأمفيبولات المكونة من سلاسل مزدوجة من رباعيات الأوجه المتصلة ، يليها الميكا المكوّنة من صفائح من رباعيات الأوجه. وعند المرحلة النهائية لكل من السلسلتين التفاعليتين المتصلة وغير المتصلة نجد الكوارتز والفلسبارات ، وهي عبارة عن ترابط إطاري (هيكلي) في الأبعاد الثلاثة من رباعيات الأوجه السيليكاتية.

وفي أثناء تبريد الصهارة في الطبيعة ، والتي تحتوي عادة على العناصر الكيميائية لكل من فلسبارات البلاجيوكليز والمعادن المافية ، فإن التبلور يحدث في نفس الوقت لكل من السلسلتين التفاعليتين . فعندما تنخفض درجة حرارة الصهارة عن 1550°م يتكون البيروكسين خلال سلسلة التفاعل غير المتصلة ويتبلور فلسبار البلاجيوكليز المكوّن من الكالسيوم النقي خلال سلسلة التفاعل المتصلة .

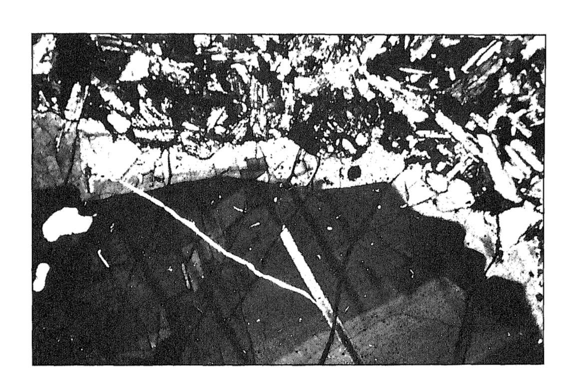
وعلى الرغم من أن هاتين السلسلتين التفاعليتين تفسرا تركيب معظم الصخور النارية ، إلا أنهما لا تستطيع تفسير تركيب بعض الصخور الأخرى . فإذا أخذنا في الاعتبار صهارة طبيعية تفاعلت كل البلورات فيها مع مصهور الصخر عند كل مراحل التبلور ، فإننا نتوقع تحت هذه الظروف أن يتكون في نهاية عملية التبلور صخر واحد مكوّن من فلسبار بلاجيوكليز واحد فقط تركيبه الكيميائي يقابل تركيب الصهارة الأم الأصلية بالإضافة إلى معدن البيروكسين. ولن نجد أي أثر لمراحل التبلور الأولى والتي تشمل فلسبار بلاجيوكليز غني بالكالسيوم والأوليفين . وعند فحص صخور بركانية أخرى يحتوي بعضها على بلاجيوكليز غني بالكالسيوم والأوليفين ، فقد يشير ذلك إلى غياب بعض مراحل عملية التبلور طبقا لنظرية التمايز الصهاري .

ج. التبلور التجزيئي

احتاجت نظرية التمايز الصهاري إلى جزء أساسي آخر ليفسر أسباب الاحتفاظ ببعض المعادن المتكونة مبكرا بينما تغير تركيب الصهير . فقد اقترح الجيولوجي الكندي بوين N.L Bowen في أوائل القرن الماضي ميكانيكية تفسر ذلك . حيث قام بوين عام 1928م بدراسة سلسلة التفاعل المتصلة وغير المتصلة ، لأنه كان مهتما بدراسة عملية التبلور وخاصة في المواقع التي لم يتغير فيها تركيب فلسبارات البلاجيوكليز ، أو المعادن المافية خلال التفاعل مع السوائل المتبقية . فإذا بردت صهارة بطريقة أسرع من المعتاد ، فإن بلورات فلسبار البلاجيوكليز في مثل هذه الصهارة قد تجد الوقت الكافي للنمو ، ولكن لن تجد البلورات الوقت الكافي للتفاعل مع الصهير إلا من خلال الأسطح الخارجية فقط . ونتيجة لذلك ، فإن الطبقة الخارجية لكل بلورة سوف يتغير تركيبها . ومع تقدم عملية التبلور فإن الأجزاء الداخلية لبلورات الفلسبار تكون غنية بالكالسيوم ويحيط بها طبقات متعاقبة من البلاجيوكليز الذي أصبح أغنى في الصوديوم ، حيث يكون الوقت غير كاف لتتحرك أيونات الكالسيوم Ca^{2+} والألومنيوم Al^{3+} إلى الخارج من بلورات البلاجيوكليز المتكونة ، لتحل محلها أيونات الصوديوم Na^{1+} والسيليكون Si^{4+} الموجودة في الصهير .

وستكون النتيجة النهائية لذلك أن يتكون ما نطلق عليه بلورة متمنطقة **zoned crystal** ، وهى بلورة مفردة من معدن واحد لها تركيب كيميائى مختلف فى أجزائها الداخلية عنه فى أجزائها الخارجية (شكل6.4). وبالإضافة إلى تأثير التبلور السريع ، فلابد أن هناك عاملا آخر يؤدى إلى عدم تغير التركيب. فإذا غلفت الأجزاء الداخلية الغنية بالكالسيوم من البلورة النامية ، فإن السائل لن يصل إلى حالة اتزان مع البلورات ، كما يحدث فى أثناء التفاعل المستمر البطىء . ولذلك يبقى السائل غنيا فى الصوديوم ، لأن الكالسيوم الموجود فى الأجزاء الداخلية للبلورة لم يعد متاحا ليحل محل الصوديوم فى المصهور.

وقد اقترح بوين نظرية لتفسير عملية التمايز الصهارى اعتمادا على التجارب المعملية والمشاهدات الحقلية . حيث يمكن خلال تلك العملية أن تتجمع البلورات المتكونة فى المرحلة المبكرة ثم تنعزل عن المصهور المتبقى بعدة طرق: منها أن يعمل الاستقرار البلورى على تجمع البلورات المتكونة مبكراً فى قاع غرفة الصهارة ، ثم تنفصل تلك البلورات عن أى تفاعلات أخرى مع السائل المتبقى. كما قد يؤدى كبس السائل المتبقى فى غرفة الصهارة نتيجة لتشوهات تكتونية لغرفة الصهارة أثناء عملية التبلور إلى عزل وضغط البلورات كجسم نارى متداخل واضح المعالم ، وبذلك فإن الصهارة تهاجر إلى أماكن جديدة لتكوّن



شكل (**6.4**) : بلورة متمنطقة **zoned crystal** لمعدن بلاجيوكليز من جبل القطرانى – الصحراء الغربية – مصر . ويلاحظ أن الأجزاء الداخلية لبلورة البلاجيوكليز تكون غنية بالكالسيوم ، وتحيط بها طبقات متعاقبة من البلاجيوكليز تزداد بها نسبة الصوديوم كلما اتجهنا ناحية النطاقات الخارجية . (أ.د. يوسف الشستاوى ، قسم الجيولوجيا ، جامعة الأزهر) .

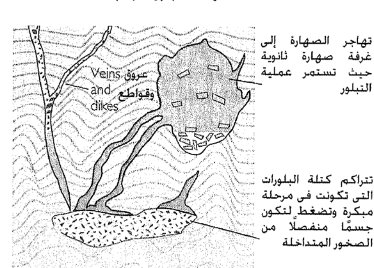
غرفًا جديدة (شكل 7.4). وسواء حدث ذلك باستقرار البلورات أو بالتشوه التكتونى ، فإن البلورات المتكونة فى المراحل المختلفة ستنعزل عن المصهور المتبقى ، والذى سوف يسلك كما لو كان قد بدأ فى التبلور فى اللحظة نفسها. ففى سلسلة التفاعل المتصلة، يبدأ الصهير الذى أصبح أغنى فى عنصر الصوديوم ، فى تكوين بلورات فلسبار أغنى فى الصوديوم من ذلك الفلسبار الذى تبلور من الصهارة التى لم يحدث فيها عزل للبلورات. ويؤدى استمرار التبلور إلى تكوّن كتلة من فلسبارات أغنى بكثير فى الصوديوم عن الصخر المتكون من الصهير الأصلى . وفى الوقت نفسه ، فإن البلورات المنعزلة والغنية فى الكالسيوم والتى تكونت فى المرحلة الأولى ، ستكوّن كتلة من الفسبار أغنى فى الكالسيوم عن المصهور الأصلى . والتبلور التجزيئى **fractional crystallization** هو المصطلح المستخدم لشرح هذا الانفصال وإزالة الأجزاء المتكونة من البلورات على التوالى عند تبريد الصهارة (شكل 7.4) . وقد اعتقد بوين أن هذه العملية تؤدى إلى الاحتفاظ بالفلسبارات الغنية بالكالسيوم فى المراحل المبكرة ، وتبلور بلاجيوكليز غنى بالصوديوم من صهارة غنية أصلاً فى الكالسيوم .

صهارة Magma

تتكون البلورات من صهارة متبردة وتهبط إلى قاع غرفة الصهارة

تراكم البلورات المتكونة فى مراحل التبريد المبكرة

أ- مرحلة التبلور المبكر



ب- يؤدى التشوة فى مرحلة لاحقة إلى عصر السائل المتبقى من كتلة البلورات المتجمعة

شكل (**7.4**): تمايز الصهارة بالتبلور التجزيئى **fractional crystallization** على مرحلتين:

(أ) تهبط البلورات المتكونة فى المرحلة المبكرة إلى قاع غرفة الصهارة ، وباستمرار عملية التبريد قد يؤدى التشوه التكتونى إلى عصر السائل المتبقى فى غرفة الصهارة ، بينما تراكم وتكبس (تدفع) البلورات لتكوّن جسما ناريا متداخلا مستقلا .

(ب) يهاجر السائل المنفصل إلى أماكن جديدة ، ليكوّن عروقا وقواطع وغرف صهارة أخر ، حيث يستمر فى التبلور .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وقد اقترح بوين أن عملية التبلور التجزيئى يمكن أن تؤثر أيضاً فى المعادن المافية فى سلسلة التفاعل غير المتصلة . وبطريقة مماثلة ، فعندما تزال أولى بلورات البلاجيوكليز أثناء التبلور ، فإن أولى بلورات الأوليفين المتكونة فى سلسلة التفاعل غير المتصلة تستقر وتنعزل من أى تفاعل لاحق . حيث نجد هذه المعادن مع مقابلها من فلسبار البلاجيوكليز. ويتبلور البيروكسين من الصهارة بعد إزالة أولى بلورات الأوليفين التى تكونت . وهكذا تؤدى كل من سلسلة التفاعل المتصلة وغير المتصلة إلى تكوين مدى من المعادن المتبلورة مشابه لتلك الموجودة فى الصخور النارية فى الطبيعة .

د – نظرية بوين للتمايز الصهارى

اعتقد بوين أن التبريد التدريجى وتمايز الصهارة البازلتية قد يؤدى إلى تكوين صهير يحتوى على نسبة أكبر من السيليكا ، وأقل فى درجة الحرارة بسبب التبلور التجزيئى . وعندما تمايز الصهارة البازلتية بالتبلور التجزيئى فى المراحل المبكرة تتكون صهارة أنديزيتية ، وتنبثق لتكوّن لابة أنديزيتية أو تتبلور ببطء لتكوّن متداخل من صخر الديوريت . وتؤدى المراحل المتوسطة من هذه العملية إلى تكوّن صهارات لها تركيب الجرانوديوريت. فإذا استمرت هذه العملية لوقت أطول ، تكونت لابات ريوليتية ومتداخلات من صخر الجرانيت فى المراحل المتأخرة (شكل 8.4) .

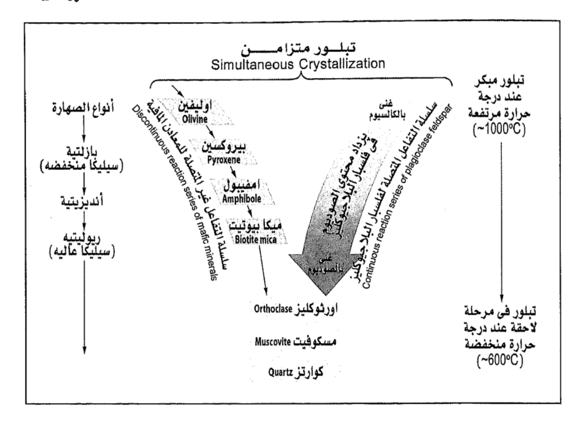
ويوضح التبلور التجزيئى والتمايز الصهارى لماذا يحدث تنوع فى تركيب الصخور النارية ، كما يجب أن يفسرا حقيقتين تبدوان متعارضتين وهما:

- الانتشار الواسع للجرانيت ، وهو صخر متداخل يقع عند نهاية الحد الأعلى لمحتوى السيليكا فى الصخور النارية ، كما أنه يحتوى على البلاجيوكليز الغنى بالصوديوم ومعادن أخرى تتميز بانخفاض درجات حرارة انصهارها.
- البازلت ، والذى يماثل الجرانيت فى سعة الانتشار. والبازلت صخر منبثق يقع عند نهاية الحد الأدنى للسيليكا فى الصخور المافية ، كما أنه يحتوى على بلاجيوكليز غنى بالكالسيوم ومعادن أخرى تتميز بارتفاع درجة حرارة انصهارها .

هـ – النظريات الحديثة بعد نظرية بوين

نجحت نظرية بوين للتمايز الصهارى فى بادئ الأمر فى شرح كيف تتكون أنواع مختلفة من الصخور النارية بالتبلور التجزيئى . كما شرحت نظرية بوين طريقة تكون الريوليت (وهو صخر منبثق مقابل للجرانيت) فى نهاية سلسلة من الانبثاقات ، والتى بدأت باللابة البازلتية .

وكما يحدث دائما عندما تستحوذ نظرية علمية جديدة على اهتمام الأوساط العلمية بسرعة ، إلا أن الأبحاث التالية أثبتت الحاجة الماسة لإدخال تعديلات عليها ؛ حيث أثبتت الأبحاث العلمية أنه لكى تتكون بلورات صغيرة من الأوليفين من صهارة لزجة وكثيفة، فإن ذلك يحتاج إلى وقت طويل جدا ، وقد لا تصل أبدا إلى قاع غرفة الصهارة . كما أوضحت أبحاث أخرى أن هناك عديدًا من المتداخلات المتطبقة التى تظهر العديد من الطبقات ذات تراكيب معدنية مختلفة ، ولايمكن تفسيرها ببساطة من خلال نظرية بوين . ولكن المشكلة الكبرى مع ذلك ، كانت وجود مصدر للأحجام الضخمة من الجرانيت الموجود على سطح الأرض ،



شكل (8.4): سلسلة بوين التفاعلية Bowen's reaction series اقترح بوين مخططا مبسطا لشرح كيف يؤدى التبلور التجزيئى fractional crystallization لصهير إلى تكوّن عدة صهارات متمايزة . حيث يوجد مساران مختلفان ومتزامنان يسمحان بتبلور عدة معادن عند تبريد صهارة بازلتية مرتفعة فى درجة حرارتها . وعلى الرغم من أن تلك السلسلة تشرح نظريا ماذا يحدث للصهارة ، إلا أنها لاتقدم الكثير فى تفسير أصل بعض الصخور النارية ، مثل التداخل الواسع للجرانيت . وعلى الرغم من ذلك فإنه تبقى لتلك السلسلة أهميتها فى فهم دور التبلور التجزيئى فى تكوين المعادن .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York)

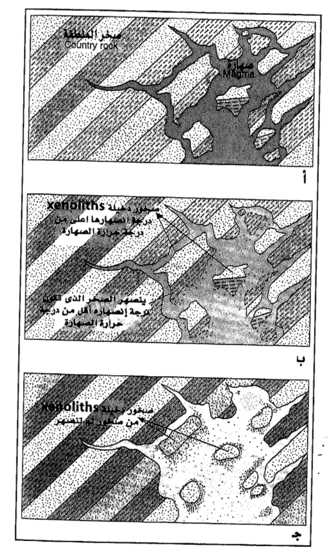
والتى لا يمكن تكوينها بالطريقة التى تقترحها نظرية بوين ، نظرا لفقد كميات كبيرة من السوائل بالتبلور من خلال المراحل المتعاقبة من التمايز. ولكى يتكون الحجم الحالى من الصخور الجرانيتية ، فإننا نحتاج إلى حجم من الصهارة البازلتية يساوى عشرة أضعاف حجم متداخلات الجرانيت . مما يتطلب تبلور كميات ضخمة من البازلت تحت المتداخلات الجرانيتية ، إلا أن الدراسات الحديثة لم تثبت وجود هذه الأحجام الضخمة من البازلت. وحتى مع وجود كميات كبيرة من البازلت- عند حيود وسط المحيط- فلم يحدث مثل هذا التحول الشامل إلى الجرانيت من خلال التمايز الصهارى . وقد كشفت الدراسات اللاحقة أن انصهار كميات ضخمة من الأنواع المختلفة للصخور فى الوشاح الأعلى upper mantle والقشرة crust يؤدى إلى تغير واسع فى تركيب الصهارات . فقد تنصهر جزئيا الصخور فى أعلى الوشاح لتكوّن صهارة بازلتية ، بينما ينصهر خليط من الصخور الرسوبية والصخور البازلتية المحيطية فى نطاق الاندساس لتتكون صهارة أنديزيتية . وقد يؤدى انصهار خليط من الصخور الرسوبية النارية والمتحولة فى القشرة القارية إلى تكون صهارة ريوليتية (جرانيتية) .

وعلى الرغم مـن أن نظريـة بـوين الأصـلية للتمايـز الصهارى قد تغيرت منذ اقترحها بوين منذ عدة عقود ، إلا أن الكثير من الأبحاث اللاحقة والتى أجريت عـلى تمايز الصخور النارية،كان مبنيا أساسا على أفكار بوين .

و- التمثل واختلاط الصهارات

تدل الدراسات الحديثة أن عملية التمايـز الصـهارى لبوين لاتكفى وحدها لتفسير نشأة كل أنواع الصـخور النارية المعروفـة ، وأن هنـاك ميكانيكيـات أخـرى قـد تؤدى أيضا إلى نشأة صـهارات ذات تراكيـب كيميائيـة مختلفة .

التمثـل الـصهارى: قـد يـسبب تـداخل الـصهارة انصهار بعض الصخور المحيطة بها ، أو ابتـلاع بعـض الصخور الصلبة وهضمها فى الـصهارة (شـكل 9.4). ويطلق على هـذه العمليـة مـصطلح **التمثـل الـصهارى magmatic assimilation** . فإذا صُهِرت أجـزاء من قشرة قارية بـصهارة بازلتيـة سـاخنة ، فـإن محتـوى الصهارة من السيليكا يزداد وتبرد الصهارة أيضا . ومـن المحتمل أن الصهارات الأنديزيتيـة المـصاحبة لبراكـين حزام المحيط الهادئ قد نشأت من تمثل صـهارة بازلتيـة لبعض صخور القشرة .



شـكل (**9.4**): التمثـل Assimilation: هـو تكـوّن صـهارة ذات تركيب متوسط بـين تركيـب الـصهارة الأصـلية وتركيـب صـخور المنطقة التى بلعت وهضمت .

(أ) تعمل الـصهارة الـصاعدة عـلى كـسر صـخور المنطقـة ، وتسمى تلك العملية بالالتهام الـصهارى magmatic stoping

(ب) تنصهر صخور دخيلة xenoliths مـن صـخور المنطقة التى تكون درجـة حـرارة انـصهارها أقـل مـن درجـة حـرارة الصهارة .

(جـ) تختلط صخور المنطقة التى تكون منـصهرة مـع الـصهارة الأصلية ، وتترك بعض الأجزاء مـن الـصخور الدخيلـة التى لم تنصهر .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

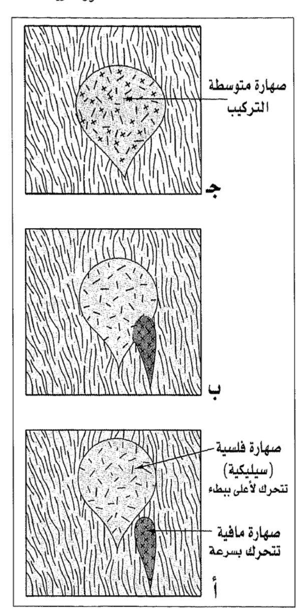
اختلاط الصهارات: هناك ميكانيكية أخرى يمكن أن تؤدى إلى تغيير تركيب الصهارة، والتى تعرف باختلاط الصهارات **magma mixing**. وقد تحدث هذه العملية عندما تتقابل صهارتان قابلتان للامتزاج وتختلطان فى القشرة ليكونا صهارة ذات تركيب متوسط (شكل 10.4). فإذا اختلطت كميتان متساويتان من صهارة بازلتية وصهارة ريوليتية (جرانيتية)، فإن الصهارة الناشئة تتبلور تحت سطح الأرض لتكوّن صخر الديوريت، وتتبلور فوق سطح الأرض لتكوّن صخر الأنديزيت.

ومن معرفتنا بكيفية تكون الصهارة، فإنه يمكن فهم مواضع تكون الأنواع المختلفة منها عند درجات الحرارة المختلفة وأماكنها فى باطن الأرض.

IV. مواضع تكوّن الصهارات وأنواعها

يقوم فهمنا لعمليات تكوين الصخور النارية على الاستدلال الجيولوجى والتجارب المعملية. ويعتمد الاستدلال الجيولوجى أساساً على النتائج المستمدة من مصدرين أساسيين. أولهما البراكين الموجودة سواء فوق سطح الأرض أو تحت الماء، حيث تنبثق الصخور المصهورة. كما تعتبر الحرارة المسجلة فى الآبار العميقة ومهوى المناجم mine shafts (فتحة رأسية يتم من خلالها تشغيل المناجم تحت السطحية) المصدر الثانى للنتائج، والتى تبين أن الحرارة الداخلية للأرض تزداد مع العمق. ولقد تمكن العلماء باستخدام هذه النتائج من تقدير المعدل الذى ترتفع به الحرارة مع زيادة العمق (تدرج حرارى temperature gradient).

وتكون درجات الحرارة المسجلة فى بعض المناطق أكبر بكثير من الدرجات المسجلة عند العمق نفسه فى مناطق أخرى، مما يدل على أن درجة حرارة بعض أجزاء القشرة الأرضية والوشاح تكون أعلى منها فى المناطق الأخرى. فعلى سبيل المثال، تزداد الحرارة



شكل (10.4): اختلاط الصهارات magma mixing
(أ) صهارتان تتحركان نحو سطح الأرض
(ب) تختلط الصهارة المافية بالصهارة الفلسية والتى تكون أغنى فى محتوى السيليكا
(جـ) تختلط الصهارتان وتكونان ذات تركيب متوسط. وتشبه تلك العملية تكوّن "كوكتيل" من صهارات مختلفة التركيب.
(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

بمعدل استثنائى فى المناطق النشطة تكتونيا أو بركانيا لتصل إلى 1500 °م عند أعماق نحو 40 كم، أى ليست بعيدة عن الحد السفلى للقشرة. وتكون هذه الحرارة

عاليـة بدرجـة كافيـة لـصهر البازلـت. أمـا فى المناطق المستقرة تكتونيا ، وعند نفس العمق فترتفع الحرارة ببطء أكثر، لتصل فقط إلى 500°م.

ومن المعروف الآن أن أنواعا عديـدة مـن الـصخور يمكن أن تتصلب من الصهارة خلال عملية الانـصهار الجزئـى. وأن ازديـاد درجـة الحـرارة فى بـاطن الأرض يمكـــن أن يـــسبب تكـــوّن الـــصهارات. ويـــسمى الجيولوجيون الصهارات بأسـماء مجموعـات الـصخور النارية المقابلـة لهـا . وتـستخدم عـادة أسـماء الـصخور البركانية ، مثل : صـهارة ريوليتيـة (مجموعـة الـصخور الفلـسية) وصـــهارة أنديزيتيـــة (مجموعـــة الـــصخور المتوسطة) وصهارة بازلتية (مجموعة الـصخور المافيـة). وسوف نستخدم تلـك المـصطلحات هنـا . وسـنناقش الأنـواع الرئيـسية للـصهارات البازلتيـة والأنديزيتيـة والريوليتية فيما يلى :

1. أصل الصهارة البازلتية

تشمل المعادن السائدة فى صخور البازلـت كـلا مـن البيروكـسين والبلاجيـوكليز ، بالإضــافة إلى بعــض الأوليفـين . وتتميـز تلـك المعـادن كلهـا بأنهـا معـادن لامائية. وترجح تلك الحقيقـة إلى احـتمال أن الـصهارة البازلتية هى صـهارة جافـة أو فقـيرة فى محتـوى المـاء . وتدل جميع المـشاهدات والـدلائل أثنـاء انبثـاق اللابـة البازلتية أن محتوى الصهارة البازلتية مـن المـاء ينـدر أن يتعدى 0.2 ٪ . لذلك ، فإنه يمكن استنتاج أن الصهارة البازلتية تنشأ نتيجـة عمليـة الانـصهار الجزئـى الجـاف للـصخور فوقالمافيـة (مثـل البريـدوتيت) المتكونـة فى الأجزاء العليا من الوشاح وعند أعماق تـصل إلى نحـو 100 كم . وتصعد الصهارة البازلتية لأعلى بعد نـشأتها بغض النظر عن القشرة التى تعلوها (قارية أو محيطية).

2 - أصل الصهارة الأنديزيتية

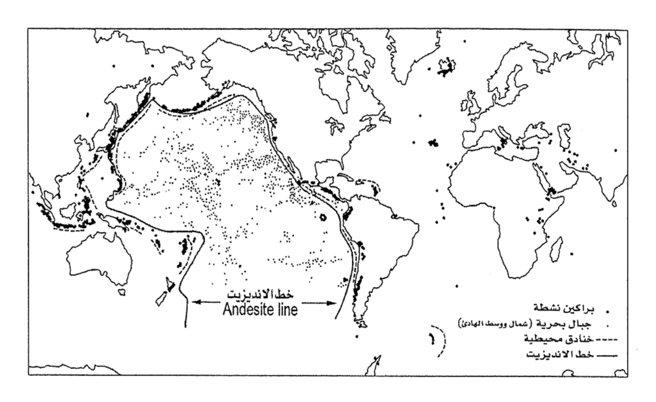
يقارب التركيـب الكيميـائى للـصهارة الأنديزيتيـة المتوسـط العـام لتركيـب القـشرة القاريـة. وتتواجـد الصخور النارية المتكونـة مـن الـصهارة الأنديزيتيـة فى القشرة القارية . وتشير تلك الحقـائق إلى إمكانيـة نـشأة الصهارة الأنديزيتية مـن الانـصهار الكامـل لجـزء مـن القشرة القارية.

وعلى الرغم مـن أن بعـض الـصهارات الأنديزيتيـة تتكون فعلاً بهذه الطريقة ، إلا أنه لوحظ انبثاق صـهارة أنديزيتية من براكين فوق القـشرة المحيطيـة بعيـدة عـن القشرة القارية ، مما يحتم ضرورة افـتراض أن الـصهارة فى تلك الحالات يجب أن تتكون إما مـن الوشـاح وإمـا من القشرة المحيطية .

وقـد أوضـحت التجـارب المعمليـة أن الانـصهار الجزئى لقشرة محيطية بازلتية تحتوى على الماء ، يؤدى إلى تكـوين صـهارة أنديزيتيـة تحـت ظـروف مناسـبة مـن الضغط والحرارة. وعنـدما ينـدس لـوح مـن الغـلاف الصخرى فى الغلاف اللدن (الأستينوسفير) فإنه يحمـل معه القشرة المحيطيه البازلتية والصخور الرسوبية التـى تعلوه ، والتى تكون مشبعة بالماء ، حيث ترتفـع درجـة حرارة اللوح . كما يؤدى الماء المنطلق من اللـوح الهـابط إلى تنشيط الانصهار الجزئى للوشاح أعلى اللوح الهابط. وفى النهاية تبدأ القشرة المحتوية على الماء فى الانـصهار، حيث يؤدى الانصهار الجزئى للـصخور المحتويـة عـلى الماء ، عند ضـغط مـساو إلى عمـق 80 كـم ، إلى تكـون مصهور له تركيب الصهارة الأنديزيتية . ويـدعم فكـرة أن معظم الصهارة الأنديزيتية تنشأ بهذه الطريقة وجـود حزام من البراكين الأنديزيتيـة النـشطة يحـيط بـالمحيط الهادئ (حول اللوح الهادئ) . ويوضـح شـكل (11.4) خط الأنديزيت Andesite Line ، وهو خـط يـوازى حواف حوض المحيط الهادئ، ويفصل المنـاطق داخـل

المحيط التى تتواجد بها صهارة بازلتية فقط عن المناطق خارج خط الأنديزيت ، والتى يكون تواجد اللابة الأنديزيتية بها شائعا . ولكن قد تتواجد بها أيضا صهارة بازلتية .

(الجرانيتيه) تحتوى على كميات ملحوظة من المعادن التى يحتوى تركيبها الكيميائى على الماء مثل معادن الميكا والأمفيبول، الذى يأتى من الماء المذاب فى الصهارة.



شكل (11.4): خط الأنديزيت andesite line الذى يوازى حواف حوض المحيط الهادئ ، ويفصل مناطق داخل المحيط تتواجد بها فقط الصهارة البازلتية من المناطق خارج الخط ، والتى يشيع بها تواجد اللابة الأنديزيتية ، بينما قد تتواجد بها أيضا صهارة بازلتية .
(After Holmes, 1978; G. A. Macdonald, Volcanoes, © 1972. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ).

3- أصل الصهارة الريوليتية

تدعم الحقيقتان التاليتان افتراض الأصل القارى للصهارة الريوليتية:

أ - تنحصر البراكين التى تنبثق منها الصهارة الريوليتية فى القشرة القارية أو فى مناطق البراكين الأنديزيتية.

ب - تطلق البراكين التى تنبثق منها الصهارة الريوليتية، كميات ضخمة من بخار الماء ، كما أن الصخور النارية المتداخلة والمتكونة من الصهارة الريوليتية

وتؤدى هاتان النقطتان إلى إمكانية نشأة صهارة ريوليتية من الانصهار الجزئى لصخور تحتوى على الماء ولها تركيب الأنديزيت ، حيث يشبه تركيب الأنديزيت المتوسط العام لتركيب القشرة القارية . وتؤيد التجارب المعملية أيضا هذا الاقتراح ؛ فقد أوضحت تلك التجارب أنه عندما انصهرت صخور تحتوى على الماء ، ولها تركيب يشبه المتوسط العام لتركيب القشرة القارية، فإن تركيب الصهارة المتكونة يكون ريوليتيا .

وبمجرد تكوّن الصهارة الريوليتية ، فإنها تبدأ فى الصعود لأعلى ببطء ، حيث تكون لزجه نتيجة احتوائها على نسبة عالية من السيليكا SiO_2 (نحو 70٪) . وأثناء صعود الصهارة ببطء فإن الضغط يقل عليها ، وبالتالى يقل أثر الماء كعامل لخفض درجة حرارة الانصهار ، حيث تؤدى زيادة الضغط إلى زيادة كمية الماء القابل للذوبان فى الصهير.

وإذا لم تتوافر الظروف التى تعمل على رفع درجة حرارة الانصهار ، فإن الصهارة الصاعدة والمتكونة بالانصهار الجزئى لصخور تحتوى على الماء تتصلب وتكوّن صخوراً نارية متداخلة فى الأعماق تحت سطح الأرض ؛ حيث إن الصهارة الصاعدة تقابل صخورا باردة ولا يوجد مصدر لرفع درجة الحرارة فى طريقها . ولذلك تقترب درجة حرارة جسم الصهارة الريوليتية الصاعد من درجة حرارة التصلب تحت سطح الأرض، وتتكوّن متداخلات من الصخور الجرانيتية ، بدلا من الانبثاق فوق سطح الأرض لتتكون لابة ريوليتية أو فتات نارى .

V. أشكال المتداخلات الصهارية

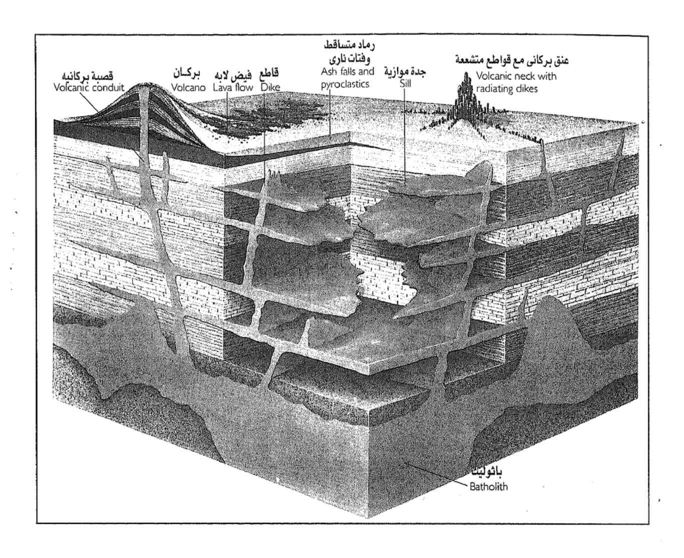
بالطبع لا يمكن تتبع أشكال الصخور النارية المتداخلة أثناء تداخل الصهارات فى القشرة الأرضية . إلا أننا يمكن أن نستنتج أشكالها الآن من خلال العمل الحقلى الجيولوجى ، الذى يقوم على رسم الخرائط ومقارنة المنكشفات البعيدة ثم إعادة تخيل تاريخها ، بعد عدة ملايين من السنين من تكوّن هذه الصخور ورفعها وتعرضها لعملية التعرية. ومع ذلك ، فإننا نملك بعض الأدلة غير المباشرة على النشاط الصهارى الحالى . فعلى سبيل المثال، تظهر لنا موجات الزلازل الحدود العامة الخارجية لغرف الصهارة التى تتواجد تحت بعض البراكين النشطة ، إلا أنها لا تستطيع التنبؤ بشكل وحجم الجسم النارى المتداخل والذى يمكن أن يتكون من غرف الصهارة. ولقد أدت الدراسات إلى وصف وتصنيف عديد من أشكال الصخور النارية المتداخلة (شكل 12.4) ومنها ما يلى :

أ. البلوتونات

تسمى كل الأجسام المتداخلة من الصخور النارية ، بغض النظر عن حجمها وشكلها ، **بالبلوتونات plutons** . ويتراوح حجم هذه الأجسام بين عدة سنتيمترات مكعبة ومئات الكيلومترات المكعبة . ومن السهل الوصول لهذه الأجسام حين تظهر على سطح الأرض نتيجة عمليات الرفع والتعرية لصخور القشرة الأرضية ، أو حين تقطعها الآبار العميقة أو المناجم . وتختلف البلوتونات ليس فى الشكل والحجم فقط ، بل فى علاقتها بالصخور المحيطة أيضا. وجدير بالملاحظة أن بعض الجيولوجيين يقصرون استخدام مصطلح بلوتون على الأجسام النارية الكبيرة المتكونة فى العمق ، ويتراوح حجمها بين كيلومتر واحد ومئات الكيلومترات المكعبة .

ويعكس هذا التنوع الواسع اختلاف طرق تداخل الصهارة أثناء صعودها فى القشرة. وتتداخل معظم الصهارات فى الأعماق الكبيرة التى تزيد عن 8 إلى 10 كم ، حيث يتواجد القليل من الكسور أو الفتحات لأن الضغط العالى للصخور التى تعلو الصهارة يغلق مثل هذه الفتحات. ومع ذلك فإنه يتم التغلب على هذا الضغط من الصهارة الصاعدة. وتكوّن الصهارات الصاعدة مكانا لها فى القشرة بواحدة من الطرق الثلاث الآتية:

1 - **باقتحام الصخور التى تعلوها**: تقوم الصهارة برفع الوزن الضخم من الصخور التى تعلوها ، مما يترتب عليه تكسير هذه الصخور فتقتحمها الصهارة وتنحشر بداخلها. وهكذا تنساب



شكل (**12.4**): الأشكال الأساسية لتواجد الصخور النارية فوق سطح الأرض: صخور نارية منبثقة **extrusive igneous rocks** (بركانية **volcanic**) ، وتحته: صخور نارية متداخلة **intrusive igneous rocks** . لاحظ أن القواطع **dikes** تقطع طبقات الصخور المحيطة ، بينما تمتد الجدد الموازية **sills** موازية لتلك الطبقات . وتعتبر الباثوليثات أكبر أشكال تواجد الصخور النارية المتداخلة .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

الصهارة داخل الصخور. وقد تتقوس الصخور التى تعلوها خلال هذه العملية.

2 - كسر كتل كبيرة من الصخور: تشق الصهارة طريقها لأعلى فى صخور القشرة المتكسرة ، وتسقط كتل من هذه الصخور فى الصهارة وتنصهر وتذوب فى الصهير، مما قد يؤدى إلى تغير تركيب الصهارة فى بعض المناطق، وهو ما يعرف بالتماثل assimilation .

3 - صهر الصخور المحيطة: قد تشق الصهارة طريقها أيضا عن طريق صهر الصخور المحيطة بها . ويوضح (شكل 9.4) الطرق الثلاث لتدخل الصهارة.

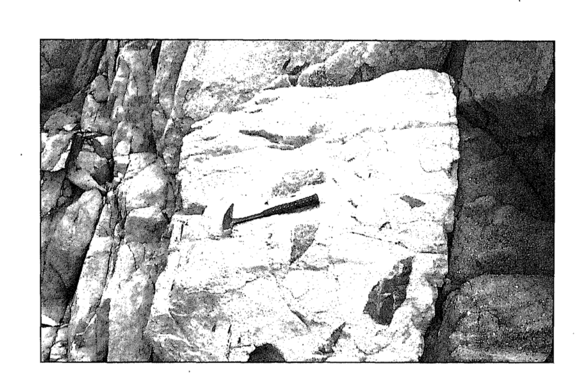
وقد توجد أحيانا صخور دخيلة **xenoliths** فى بعض المتداخلات ، والتى تتكون من قطع من صخور المنطقة ، وتكون محاطة بالكامل بالمادة المتداخلة . وهذه القطع الصخرية التى كانت طافية فى الصهارة المتداخلة (شكل 13.4) ، دليل جيد على اقتحام الصهارة للصخور المحيطة أثناء تكوّن الجسم النارى .

ويكون لمعظم البلوتونات حدود تلامس حادة

والجرنتة **granitization** هى العملية التى يتكون بها الجرانيت من صخور أخرى سابقة بإعادة التبلور، مع حدوث انصهار كامل أو دون أى انصهار .

1. الباثوليثات

تعتبر الباثوليثات **batholiths** أكبر البلوتونات حجما ، حيث تتكون من كتلة ضخمة غير منتظمة من



شكل (**13.4**): صخور دخيلة **xenoliths** فى جرانيت طريق قفط – القصير – الصحراء الشرقية – مصر (أ. د. ممدوح عبد الغفور حسن . هيئة المواد النووية)

sharp contacts مع الصخور المحيطة. كما توجد أدلة أخرى على تداخل هذه الأجسام على هيئة صهارة سائلة فى الصخور الصلبة. وقد تتداخل بعض البلوتونات فى الصخور المحيطة فتؤدى إلى تكوّن بعض التراكيب التى تشبه تراكيب الصخور الرسوبية. وتؤدى هذه الظواهر إلى الاعتقاد بأن هذه البلوتونات قد تكونت من صخور رسوبية سابقة ، بعملية الجرنتة .

صخور نارية خشنة التبلور ، تغطى 100 كم^2 على الأقل (شكل 12.4) . وتسمى البلوتونات الأصغر بالكتلة الشاخصة أو الاستوك **stock** . وعندما تأخذ الكتلة الشاخصة شكلا مستديرا فإنها تعرف بالحدبة **boss** . وتكون كل من البلوتونات والكتل الشاخصة عبارة عن متداخلات غير متطابقة **discordant**

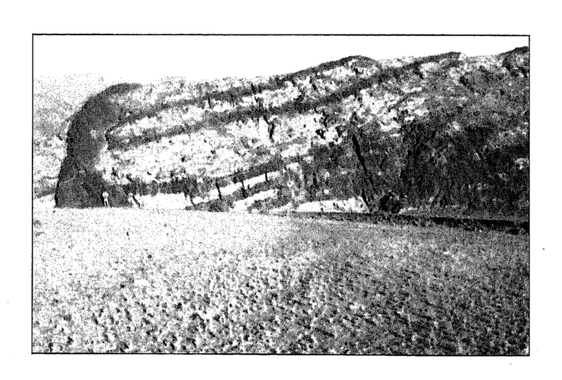
intrusions، أى تقطع طبقات الصخور المحيطة التى تتداخل فيها هذه الأجسام النارية.

وتتواجد الباثوليثات فى لب سلاسل الجبال المشوهة تكتونيا (بنائيا). ولقد أظهرت المشاهدات الحقلية أن الباثوليثات عبارة عن أجسام تشبه الفرش الأفقية ، أو أجسام سميكة مفصصة تمتد من جزء أوسط يشبه القمع. وقد تمتد أعماق الباثوليثات إلى 10 أو 15 كم ، بينما قد يمتد بعضها الآخر إلى أعماق أكبر. ويظهر التبلور الخشن لصخور الباثوليثات ، أنها تتبلور فى أعماق كبيرة ، ونتيجة تبريد بطىء.

2. الجدد الموازية والقواطع

تختلف الجدد الموازية والقواطع عن الباثوليثات فى جوانب عدة ، منها أنها تكون أصغر حجما ، كما ترتبط بالصخور المحيطة بها بعلاقات مختلفة . والجدد الموازية **sills** عبارة عن متداخلات متطابقة **concordant intrusions** ، أى تكون حدودها موازية للطبقات المحيطة بها . وتتكون من أجسام مسطحة (صفائح) منبسطة مستوية الأسطح تكونت نتيجة حقن الصهارة فى صخور سابقة متطبقة وبين طبقتين متوازيتين (شكلا: 4. 12 و 14.4). ويتراوح سمك الجدة الموازية بين سنتيمترات قليلة ومئات الأمتار ، كما قد تمتد هذه الجدد لمسافات بعيدة .

وتعتبر القواطع **dikes** هى الطرق الرئيسية لانتقال الصهارة فى القشرة . وهى تشبه الجدد الموازية فى أنها أجسام نارية مستوية السطح ، إلا أن القواطع تقطع طبقات الصخور المحيطة (شكل 4. 12 و 14.4) . أما الجدد الموازية فتكون موازية لها. وتتكون القواطع أحيانا نتيجة الحقن فى كسور قديمة موجودة قبل الحقن، إلا أنها غالبا ما تفتح قنوات (فتحات) خلال

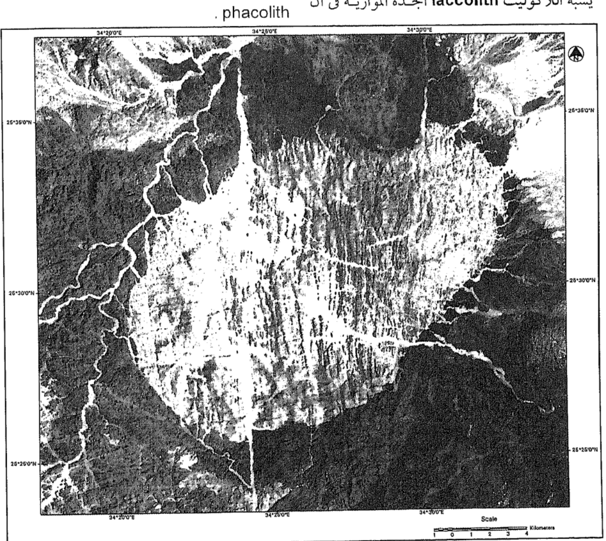


شكل (**14.4**): جدد موازية **sill** تمتد موازية لصخور الشست المحيطة ، بينما يظهر على يسار الصورة قاطع **dyke** يقطع صخور الشست . وادى أم غيج – الصحراء الشرقية – مصر .

كسور جديدة تحت ضـغط الحقـن الـصهارى. وجـدير بالـذكر أن بعـض القواطـع يمكـن تتبعهـا لعـشرات الكيلومترات . ويتراوح سمك القواطع من عدة أمتـار إلى سنتيمترات قليلة.

ونادرا ما توجد القواطع مفردة ، حيث تتواجد عادة فى أعداد كبيرة ، أو على هيئة حـشود dyke swarms مكونة من مئات أو آلاف القواطع (شكل 15.4). وقد تكـون هـذه المجموعـات مـن القواطـع متوازيـة ، أو شعاعية أو متجـاوزة en echelon حيـث قـد تكـون خرجت من مصدر صهارى واحد.

يشبه اللاكوليث **laccolith** الجـدة الموازيـة فى أن الجدة تتكون من حقن الصهير بين طبقتين من الصخور الرسوبية قرب سطح الأرض . أما اللاكوليث فيتكـون من صهير غنى بالسيليكا، مميز بدرجة لزوجة أعلى مـن الصهارات المافية. لذلك فإنـه يتجمـع عـلى هيئـة كتلـة عدسية الشكل تشبه فطر عيش الغراب ، وتعمـل عـلى تقوس الـصخور التـى تعلوهـا . أمـا قـاع اللاكوليـث فيكـــون مـــسطحا (شـــكل 11.5) . ويـــتراوح قطـــر اللاكوليث من 1 إلى 8 كم. ويصل أقصى سمك لها إلى نحو 1000 كم . وقد تأخذ الأجسام النارية شكل طبق تحـت سـطح الأرض ، وتعـرف حينئـذٍ باللوبوليـث lopolith ، أو تأخذ شكل سَرجًا وتعـرف بالفاكوليـث phacolith .



شكل (15.4): صورة فضائية توضح حشودا من القواطع dyka swarms تقطع الصخور الجرانيتية كدابورا . وسط الصحراء الـشرقية – مصر .

ب. العروق

العروق **veins** عبارة عن رواسب من المعادن مرتبطة بالأجسام النارية القريبة وتكون غريبة عن الصخور المحيطة بها . وهى تشبه القواطع فى أنها تملأ فراغات الصخور المحيطة. وقد تنشأ العروق على هيئة أجسام غير منتظمة أو على شكل صفائح منبسطة أو مستدقة مثل القلم، تتفرع من قمة وجوانب عديد من المتداخلات النارية. ويتراوح عرض العروق بين عدة ميليمترات وعدة أمتار، بينما يتراوح طولها بين عشرات الأمتار و الكيلومترات . وأكثر أنواع العروق شيوعا عروق الكوارتز، حيث يكوّن معدن الكوارتز معظم العرق ، بالإضافة إلى بعض الكبريتيدات والفلزات العنصرية مثل الذهب أو الفضة التى تتواجد بنسب ضئيلة للغاية . وتسمى العروق المتكونة من صخور الجرانيت خشنة التبلور جدا **بالبجماتيت pegmatites** حيث تبلغ البلورات عدة سنتيمترات (شكل 2.4) أو حتى عدة أمتار طولا . وتتبلور تلك العروق فى المراحل النهائية لتصلب صهارة غنية بالماء . وتحتوى البجماتيت على خامات من العناصر النادرة والفلزات الثقيلة .

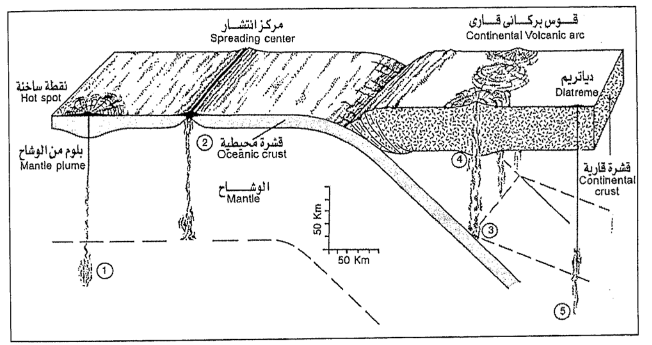
وتكون بعض العروق ممتلئة بالمعادن التى تحتوى على كميات كبيرة من الماء المرتبط كيميائيا بالمعادن ، والتى تتبلور من محاليل مائية ساخنة . وتظهر التجارب المعملية أن هذه المعادن تتبلور عند درجات حرارة مرتفعة تتراوح بين 250° إلى 350°م ، وهى درجة أقل من درجة حرارة الصهارات عموما . ويوضح تركيب المعادن فى هذه العروق الحرمائية **hydrothermal veins** (من الكلمة اليونانية hydro بمعنى ماء ، وthermal بمعنى حرارة) أن الماء كان متواجدا بوفرة أثناء تكوّن العروق . وسيتم مناقشة العروق الحرمائية وما تحويه من خامات ذات قيمة اقتصادية فى الفصل التاسع عشر من الكتاب.

IV. النشاط النارى وتكتونية الألواح

لقد أمكن تحديد درجات الحرارة والضغوط التى تنصهر عندها الأنواع المختلفة من الصخور من التجارب المعملية . وتعطينا هذه النتائج فكرة عن الأماكن التى يمكن أن يحدث فيها الانصهار. فالبازلت ينصهر عند درجة حرارة تزيد بمئات الدرجات عن درجة انصهار خليط من الصخور الرسوبية ؛ مما يعنى أن البازلت يبدأ فى الانصهار فى الأماكن النشطة تكتونيا من الوشاح بالقرب من الحد السفلى للقشرة ، بينما تنصهر الصخور الرسوبية عند أعماق أقل من البازلت. وتربط طريقة حركة اللوح بين النشاط التكتونى وتركيب الصخور المنصهرة .

وهناك نوعان من حدود الألواح يصاحبها تكوين الصهارات وهى حيود وسط المحيط حيث يتباعد لوحان ويحدث انتشار لقاع المحيط ، ونطاقات الاندساس حيث يؤدى تقارب لوحين إلى أن يندس أحدهما تحت الآخر (شكل 16.4) . وتتواجد معظم أماكن تكوّن الصخور النارية عند نطاقات التباعد– أى عند حيود وسط المحيط mid-ocean ridges – حيث يتكون البازلت نتيجة الانصهار الجزئى للوشاح ويصعد مع تيارات الحمل الدورانية الصاعدة. وتنبثق الصهارة على هيئة لابات، يتم تغذيتها من غرف الصهارة أسفل محور حيود وسط المحيط ، بينما تقتحم (تتموضع) متداخلات صخور الجابرو فى الوقت نفسه ولكن فى أعماق أكبر .

أما نطاقات الاندساس subduction zones حيث يندس لوح تحت آخر، فهى أكثر مواقع انصهار الصخور. حيث تحتوى قمة اللوح الصخرى المندس على قشرة محيطية متكونة أساساً من البازلت الذى نشأ أصلاً عند حيود وسط المحيط ، وبالإضافة إلى ذلك يحمل اللوح الماء ورسوبيات محيطية لينة تجمعت أثناء حركة اللوح من حيد وسط المحيط إلى نطاق الاندساس. ويقابل اللوح أثناء حركته إلى أسفل درجات حرارة متزايدة وضغط مما يؤدى إلى تحول الرسوبيات أولاً إلى صخور رسوبية ثم إلى صخور متحولة عند الأعماق الأكبر. وحيث إن هذه الصخور تحتوى على كميات كبيرة من الماء ، لذلك فإن هذه المواد تتميز بدرجات انصهار أقل من درجة انصهار القشرة أو الوشاح الجافَّين اللذين لا يحتويان على هذه الكميات من الماء. وعندما يتحرك اللوح الصخرى إلى أعماق أكبر ترتفع درجات الحرارة حتى تصل إلى درجة انصهار الصخور الرسوبية أو الصخور المتحولة. وباستمرار الحركة إلى أسفل، يقابل اللوح فى النهاية درجات حرارة كافية لصهر الأجزاء العلوية من البازلت. وهكذا، فإن الاندساس يؤدى إلى تكوّن صهارة ، أو ربما عدة صهارات مختلفة الأنواع.



شكل (16.4): مواضع تكون الصهارات وعلاقتها بتكتونية الألواح

1. تتكون صهارة بازلتية فى الأجزاء السفلى من الوشاح تصعد خلال بلوم plume (سلسلة جزر بركانية داخل الألواح المحيطية وبعيدًا عن حدود تلك الألواح) .
2. تتكون صهارة بازلتية فى الأجزاء العليا من الوشاح تحت مركز انتشار spreading center (عند حيود وسط المحيط mid-ocean ridge) .
3. تتكون صهارة مافية إلى متوسطة عندما تتقابل قمة لوح صخرى مندس مع قاعدة لوح علوى راكب overriding plate.
4. تتكون صهارات تتراوح من بازلتية إلى ريوليتية نتيجة تفاعل صهارة صاعدة مع قاع قشرة قارية .
5. تتكون صهارة فوقمافية فى الأجزاء السفلى من الوشاح لتصعد وتكوّن صخر الكمبرليت، وهو الصخر الذى لا يوجد الماس إلا فيه . ويمثل الخط المتقطع قاعدة الغلاف الصخرى .

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

وحينما تتصاعد الصهارات والماء الناتجة من التفاعلات التى تؤدى إلى انتزاع الماء من قمة اللوح المندس المنصهر، فإنها قد تسبب انصهار أجزاء من اللوح العلوى فوق نطاق الاندساس وتغير تركيبه. كما قد تتمايز الصهارات بالتبلور التجزيئى، ويتكون نتيجة لذلك صخور نارية متداخلة ومنبثقة (بركانية) . وتنبثق من البراكين فوق الأجزاء العميقة من نطاق الاندساس لابات بازلتية وأنديزيتية وريوليتية وفتات نارى ، مكونة بذلك أنواعا عديدة من الصخور البركانية. وتكوّن هذه البراكين والبركانيات المندفعة منها أقواس جزر محيطية island arcs بركانية مثل جزر الإليوشان فى الاسكا.

أما إذا حدث الاندساس أسفل قارة ، فإن عديدًا من كتل البراكين والصخور البركانية تلتحم ببعضها بعضا لتكوّن قوسا بركانيا volcanic arc (قوس جبلى mountainous arc) على الأرض. ومن أمثلة اندساس لوح محيطى أسفل آخر قارى تكوّن سلسلة جبال الأنديز والكاسكيد المتواجدة على هيئة قوس من البراكين النشطة ، تضم بركان جبل سانت هيلين فى شمال كاليفورنيا ، وأوريجون وواشنطن . وبينما تتكون الجبال فوق القارات، تتبلور الصهارات المتداخلة فى الأعماق لتكوّن صخورا نارية تتراوح من المافية إلى الفلسية تبعا لتركيب الصهارة ودرجة التمايز.

وتعتبر جزر اليابان مثالاً للمتداخلات والانبثاقات المعقدة التى تكونت وتطورت فى نطاق اندساس عبر ملايين السنين. وفى كل مكان من هذا البلد الصغير، توجد كل أنواع الصخور النارية المنبثقة من أعماق مختلفة، والتى تداخلت مع صخور بركانية متحولة وصخور متداخلة متوسطة ومافية وصخور رسوبية تكونت نتيجة تعريه الصخور النارية.

بلومات الوشاح : يعتقد العلماء أن النقاط الساخنة **hot spots** تمثل تعبيرا عن البلومات **plumes** الصاعدة باستمرار والمسئولة عن تدفق كميات ضخمة من البازلت ؛ حيث يتواجد هذا البازلت فوق بعض القارات بعيدا عن حدود الألواح فى تتابعات سميكة مماثلة لتلك الموجودة عند حيود وسط المحيط . ومن أمثلة هذا البازلت ، ذلك الموجود فى ولايات واشنطن وأوراجون وإيداهو فى الولايات المتحدة الأمريكية حيث يغطى البازلت مساحات شاسعة ، نتيجة تدفق اللابات لملايين السنين . كما انبثقت أيضا كميات كبيرة من البازلت من جزر بركانية منفصلة بعيدا عن حيود الألواح المحيطية ، مثل جزر هاواى فى وسط اللوح الهادئ . وفى مثل هذه المناطق تصعد البلومات الرقيقة التى تشبه ريشة الرسام أو قلم الرصاص من صهارات البازلت الساخنة من أعماق الوشاح ، وربما من أعماق تصل إلى قرب الحد بين اللب والوشاح .

والخلاصة أن صهارات البازلت تتكون فى الأجزاء العليا من الوشاح أسفل حيود وسط المحيط ، وفى الأجزاء السفلى من الوشاح أسفل النقاط الساخنة داخل الألواح . وتتكون صهارات مختلفة التركيب فى نطاقات الاندساس اعتمادا على كمية المواد الفلسية والماء الذى تساهم به الصخور فوق نطاق الاندساس فى الصخور المنصهرة.

الملخص

1 - تقسم الصخور النارية إلى قسمين رئيسين بناءً على نوع النسيج ، وهما :
صخور خشنة التبلور وتميز الصخور المتداخلة، حيث كان التبريد بطيئا ، وصخور دقيقة التبلور تميز الصخور المنبثقة (البركانية) ، حيث كان التبريد سريعا . وتشمل الصخور المنبثقة اللابات المتصلبة

والصهارات الصاعدة إلى سطح الأرض والصخور الفتاتية النارية التى تتكون من كسرات الفتات النارى (بلورات أو زجاج أو صخور).

2 - كما تصنف الصخور النارية (المتداخلة والمنبثقة) على أساس كيميائى طبقاً لمحتواها من السيليكا ، أو على أساس التركيب المعدنى حسب نسبة المعادن الفلسية فاتحة اللون، والمعادن المافية داكنة اللون . وتتميز الصخور الفلسية مثل الجرانيت ويقابله الريوليت من الصخور المنبثقة بأنها غنية فى عنصر السيليكا (صخور حامضية) . كما تتميز بسيادة الكوارتز والفلسبار البوتاسى وفلسبار البلاجيوكليز الغنى بالصوديوم . بينما تتميز الصخور المافية مثل الجابرو ويقابله البازلت من الصخور المنبثقة ، بأنها تكون فقيرة فى نسبة السيليكا ، وتتكون أساسا من البيروكسين والأوليفين وفلسبار البلاجيوكليز الغنى بالكالسيوم . وتشمل الصخور المتوسطة صخور الجرانوديوريت والديوريت ويقابلهما من الصخور المنبثقة الداسيت والأنديزيت.

3 - تتبلور المعادن من الصهارات فى سلسلتين هما سلسلة تفاعل متصلة لفلسبار البلاجيوكليز وسلسلة تفاعل غير متصلة للمعادن المافية . وتتفاعل البلورات الناشئة من هاتين السلسلتين مع الصهير باستمرار فى مراحل متتابعة من التبلور وتغيير تركيب الصهارة حتى تتصلب تماما عند نقطة يكون فيها الصخر النهائى له تركيب الصهارة الأصلية نفسها. ويحدث التبلور التجزيئى ، حين لا تتفاعل البلورات مع الصخور بسبب نمو البلورات بسرعة أو بسبب فصل البلورات من الصهير . وتتميز البلورات النهائية بنسبة سيليكا أكبر من البلورات الأكثر مافية ، والتى تكونت فى المراحل المبكرة.

4 - تشرح سلسلتى بوين التفاعلية المتصلة وغير المتصلة كيف تتكون صخور نارية مافية نتيجة التبلور التجزيئى فى المراحل المبكرة للتبلور والتمايز بينما تتكون صخور فلسية فى المراحل النهائية. ولكن تفشل نظرية بوين فى شرح تواجد صخور الجرانيت بوفرة.

5 - تتكون الصهارات فى الأماكن السفلية من القشرة وفى الأجزاء العليا من الوشاح حيث ترتفع درجة الحرارة والضغط بدرجة تكفى للانصهار الجزئى للصخور المحتوية على الماء.

(أ) قد يؤدى الانصهار الجزئى للصخور الجافة فى الأجزاء العليا من الوشاح إلى تكوّن صهارة بازلتية.

(ب) قد ينصهر خليط من الصخور الرسوبية والصخور البازلتية المحيطية الموجودة المشبعة بالماء فى نطاقات الاندساس مما يؤدى إلى تكون صهارة أنديزيتية ، كما تنشأ الصهارة الأنديزيتية أيضا نتيجة الانصهار الكامل لجزء من القشرة القارية.

(جـ) قد يؤدى انصهار خليط من الصخور الرسوبية والنارية والمتحولة فى أسفل القشرة القارية إلى تكوّن صهارة ريوليتية (جرانيتية). وتساهم عمليتى التمثل واختلاط الصهارات فى نشأة صهارات ذات تركيبات كيميائية مختلفة .

6 - تسمى كل الأجسام المتداخلة من الصخور النارية بغض النظر عن شكلها أو حجمها أو علاقتها بالصخور المحيطة بالبلوتونات . وتعتبر

الباثوليثات أكبر البلوتونات حجما . بينما يعتبر الاستوك أقل حجما من الباثوليثات . وتتداخل الجدد الموازية متدفقة بين طبقات الصخور المحيطة وموازية لها . أما القواطع فإنها تشبه الجدد الموازية وتختلف عنها فى أنها تقطع طبقات الصخور التى تتداخل فيها. وتتكون العروق الحرمائية حيث يتواجد الماء بوفرة إما فى الصهارة وإما فى الصخور المحيطة .

7 - تشير العلاقة بين الصخور النارية وتكتونية الألواح إلى أن هناك مكانين رئيسيين للنشاط الصهارى هما حيود وسط المحيط حيث يتصاعد البازلت من الأجزاء العليا للوشاح ، ونطاقات الاندساس حيث يؤدى اندساس قشرة محيطة فى أعماق القشرة والأجزاء العليا من الوشاح إلى تكوّن سلسلة من الصهارات المتمايزة تؤدى إلى تكوّن صخور متداخلة وصخور منبثقة فى أقواس جزر بركانية أو أقواس بركانية فوق القارات . وبالإضافة إلى المواقع السابقة ، تتكون أحجام كبيرة من البازلت فى الجزر المحيطية أو فوق الكتل القارية داخل الألواح نتيجة تواجدها فوق بلومات صاعدة من الوشاح.

مواقـع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.prenhall.com/tarbuck
http://www.mhhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhtml
http://www.geolab.unc.edu/Petunia/IgMetAtlas/plutonic-micro%7F/plutonicmicro.html

المصطلحات المهمة

andasite	أنديزيت	magma chamber	حجرة صهارة
assimilation	تمثل	magma mixing	اختلاط الصهارات
basalt	بازلت	magmatic differentiation	تمايز صهارى
batholiths	باثوليثات	obsidian	أوبسيديان
concordant intrusions	متداخلات متطابقة	partial melt	مصهور جزئى
continuous reaction series	سلسلة التفاعل المتصلة	partial melting	انصهار جزئى
country rocks	صخور المنطقة أو الإقليم	pegmatite	بجماتيت
dacite	داسيت	peridotite	بريدوتيت
dike	قاطع (ج.قواطع)	plumes	بلومات
diorite	ديوريت	plutons	بلوتونات
discontinuous reaction series	سلسلة التفاعل غير المتصلة	pumice	بيومس
discordant intrusions	متداخلات غير متطابقة	pyroclastic rocks	صخور فتاتية نارية
extrusive igneous rocks	صخور نارية منبثقة	pyroclasts	فتات نارى
felsic	فلسى	rhyolite	ريوليت
fractional crystallization	تبلور تجزيئى	sill	جدة موازية (ج. جدد موازية)
gabbro	جابرو	stock	كتلة شاخصة أو استوك
glass	زجاج	texture	نسيج
granite	جرانيت	ultramafic rock	صخر فوقمافى
granitization	جرنتة	veins	عروق
granodiorite	جرانوديوريت	viscosity	لزوجة
hot spots	نقاط ساخنة	volcanic ash	رماد بركانى
hydrothermal veins	عروق حرمائية	volcanic rocks	صخور بركانية
intrusive igneous rocks	صخور نارية متداخلة	xenoliths	صخور دخيلة
laccolith	لاكوليث	zoned crystal	بلورة متمنطقة
lava	لابة		
mafic	مافى		
magma	صُهّارة		

الأسئلة

1. لماذا تكوّن الصخور النارية المتداخلة خشنة التبلور والصخور النارية المنبثقة دقيقة التبلور؟
2. اذكر أنواع المعادن التى توجد فى صخر نارى مافى.
3. ما أنواع الصخور النارية التى تحتوى على الكوارتز؟
4. اذكر اسمى صخرين ناريين متداخلين يحتويان على نسبة من السيليكا أعلى من تلك الموجودة فى الجابرو .
5. ما الفرق بين السلسلتين التفاعليتين المتصلة وغير المتصلة؟
6. كيف يؤدى التبلور التجزيئى إلى التمايز الصهارى؟
7. اذكر أين يمكنك أن تجد انصهارا جزئيا لتركيب بازلتى فى القشرة أو الوشاح أو اللب .
8. كيف يمكن أن نميز بين القاطع والجدة الموازية؟
9. اذكر الأدلة الحقلية التى تستخدم للتأكد من أن البازلت تكوّن كقاطع أو لابة منسابة.
10. اذكر فى أى مواقع تكتونية الألواح يمكن أن نتوقع تكوّن صهارات .
11. لماذا تهاجر الصهارات لأعلى ؟
12. اذكر من أين تنبثق الصهارات البازلتية فوق قاع المحيط ز

الفصل 5

البراكين

I. مصدر اللابات

II. الصخور والغازات التى تقذفها البراكين :

أ – الغازات

ب – اللابات :

1. أنواع اللابات
2. أنسجة اللابات

ج – الرواسب الفتاتية النارية :

1. المقذوفات البركانية
2. فيض الفتات النارى

III. أنواع الانبثاقات ومعالمها :

أ – الانبثاقات المركزية :

1. البراكين الدرعية
2. القباب البركانية
3. مخاريط الحمم الفتاتية
4. البراكين المركبة
5. فوهات البراكين والمعالم البركانية الأخرى

ب – الانبثاقات الشقية :

1. بازلت فيضى (الهضاب البازلتية)
2. رواسب فيض الرماد

ج – بعض الظواهر البركانية الأخرى :

1. اللاهار
2. الـداخنات والينـابيع الحـارة والفـوارات (والجيزارات) :

IV. التبركن وتكتونية الألواح :

أ – التبركن عند حدود الألـواح المتباعـدة (تـبركن نطـاق الانتشار)

ب – التبركن عند الحدود المتقاربة (تبركن نطاق التقارب)

1. التبركن فى التقارب المحيطى – المحيطى

2. التبركن فى التقارب المحيطى – القارى

ج – التبركن داخل الألواح

V. البراكين والمناخ

VI. تقليل مخاطر كوارث البراكين

VII. الاستفادة من البراكين

كان جبل سانت هيلين Mount St. Helens فى ولاية واشنطن بركانا مخروطيا عاليا يصل ارتفاعه إلى 2950 مترا صباح يوم 18 مايو 1980م ، وعند الغروب أصبح جبلاً قبيحا يبلغ ارتفاعه 2550 مترا ، تغطيه سحابة من الغازات والرماد تصاعدت من فوهة جديدة أخذت شكل حدوة الحصان. وقد أزال الانهيال الكتلى الضخم الجانب الشمالى للجبل تماما ، مسببا انفجارا ضخما مزق قمة الجبل ، ودمر غابة بها نحو عشرة ملايين شجرة وقتل 57 شخصا. كما اندفعت من البركان سحابة ضخمة من الغازات والرماد لأعلى ، وصلت درجة حرارتها إلى نحو 800 °م ، غطت وسط واشنطن ، وامتدت شرقا إلى الشاطئ خلال الأيام الثلاثة التالية. واندفع العاملون بالبراكين من كل أنحاء العالم نحو ولاية واشنطن ليجدوا إجابات عن أسئلتهم: ماذا حدث ؟ ، ولماذا ؟ . بالإضافة إلى أسئلة أخرى عن الدروس المستفادة مما حدث فى جبل سانت هيلين للاستفادة بها فى مناطق أخرى بها براكين خطيرة.

ويقع بركان سانت هيلين وبراكين أخرى نشطة على امتداد "حلقة النار Ring of fire"، وهى حزام من الجبال الحديثة والزلازل والبراكين تحيط بالمحيط الهادئ، ولذا يعرف باسم الحزام حول الهادئ circum–Pacific belt . وهنا يبرز السؤال : لماذا لا توجد البراكين موزعة عشوائيا فى مختلف أنحاء العالم ؟ ، ولماذا هى شائعة فى مناطق أكثر من الأخرى؟. وللإجابة على هذه الأسئلة وغيرها حول موضوع البراكين ، كان هذا الفصل الذى يتناول لتبركن **volcanism** ، وهى العملية التى تصعد بها الصهارة من داخل الأرض خلال القشرة الأرضية لتظهر على السطح على هيئة لابة ، وتبرد لتكوّن صخرا بركانيا صلبا. وتكون الصخور البركانية نحو 80 ٪ من القشرة الأرضية ، سواء كانت محيطية أو قارية .

وسوف نتناول فى هذا الفصل أيضا الأنواع الرئيسية للابات ، وأنواع الثورات والملامح التضاريسية التى تكوّنها ، وأنواع التلوث البيئى التى تسببها البراكين ، حيث يمكن اعتبار البراكين نافذة يمكن من خلالها ملاحظة باطن الأرض . كما سنوضح فى هذا الفصل أيضا كيف يمكن أن تفسر تكتونية الألواح وجود معظم البراكين عند حواف الألواح ، مع وجود القليل منها فوق النقاط الساخنة hot spots داخل الألواح . وفى النهاية ، سنناقش كيفية التحكم فى الطاقة التدميرية للبراكين ، والاستفادة من الطاقة الحرارية الناشئة عنها والعناصر الكيميائية المصاحبة لها.

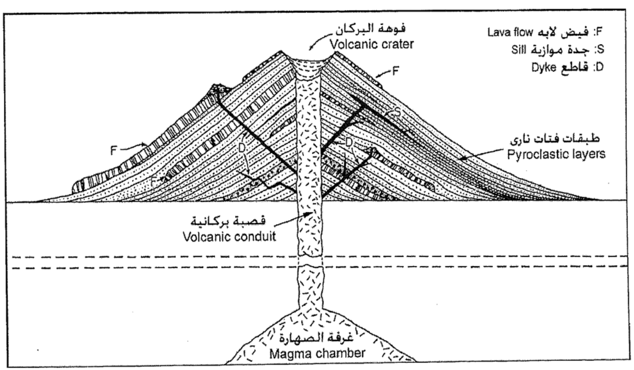
أ. مصدر اللابات

روعت ثورات البراكين والمواد المصاحبة لها قدامى الفلاسفة ، مما حدا بهم لنسج الأساطير عن عالم شيطانى ساخن تحت سطح الأرض . وقد كانت فكرة القدامى صحيحة ، حيث لا يجد الجيولوجيون الآن دليلا على طبيعة الحرارة الداخلية للأرض غير البراكين.

وتظهر نتائج تسجيل درجات الحرارة أثناء حفر الآبار العميقة فى الأرض (نحو 10كم) أن درجة حرارة الأرض تزداد بزيادة العمق ، حيث ترتفع درجة الحرارة بمعدل 30°م لكل كيلومتر عمقا . ويعتقد الآن أن درجات الحرارة تصل إلى 1100° م وإلى 1200° م

عند أعماق الغلاف اللدن (الأسثينوسفير)، والذى يمتد من نحو 100 إلى 350 كم. وهى درجة حرارة عالية بما يكفى لأن تبدأ عندها الصخور فى الانصهار. ولذلك يعتقد الجيولوجيون أن الغلاف اللدن هو المصدر الرئيسى للصهارة magma، وهى الصخور المنصهرة تحت سطح الأرض، والتى تعرف باللابة **lava** عندما تنبثق فوق سطح الأرض. ويستخدم مصطلح اللابة للدلالة أيضا على الصخر الذى تصلدت منه. كما يعتقد أن الانصهار الجزئى partial melting لبعض أجزاء الغلاف الصخرى الصلب الذى يعلو الغلاف اللدن هو مصدر آخر للصهارة. وتصعد الصهارة كما لو كانت تطفو، لأن كثافة الأجزاء المنصهرة عند هذه الحرارة تكون أقل من كثافة الصخور المحيطة المتبقية. وتضغط الصخور المحيطة الأكثر كثافة على الصهير لتعصره وتدفعه إلى أعلى. كما قد يجد الصهير طريقة إلى سطح الأرض خلال كسور الغلاف الصخرى، أو بصهر الصخور. وقد تصل بعض الصهارة فى النهاية إلى سطح الأرض وتنبثق على هيئة لابة.

والبركان **volcano** مصطلح مشتق من اسم إله النار عند الرومان والمسمى فولكان Vulcan، وهو عبارة عن تل أو جبل، يأخذ عادة شكلا مخروطيا، تكوّن من تراكم مواد تنبثق على سطح الأرض. ويمثل شكل (1.5) رسما تخطيطيا لبركان يوضح النظام الموجود بالبراكين، والذى يشبه نظام خطوط أنابيب المياه، والذى يؤدى إلى دفع الصخور المنصهرة فى الأعماق من غرفة الصهارة، وينشئ مخرجا لها عند سطح الأرض، تصعد منه الصهارة خلال قناة تشبه الأنبوب تعرف بالعنق المركزى (مخرج) **central vent** أو القصبة البركانية **volcanic conduit** للبركان. وتوجد فوق المخرج المركزى حفرة على شكل قمع تعرف بفوهة البركان **crater**.(انظر شكل 1.5



شكل (1:5): بركان مركب composite volcano يتكون من مخروط وفوهة وعنق مركزى وغرفة صهارة. لاحظ تبادل فيوض اللابة مع طبقات الفتات النارى.

وشكل 18.5) . ويتم ملء غرفة الصهارة القريبة من سطح الأرض أسفل قمة البركان دوريا بالصهارة الصاعدة من أسفل ، وتفرغ على السطح فى دورات من الثورات . ويمكن أن تنبثق اللابة أيضا من كسور على جوانب البركان.

ويهتم الجيولوجيون بدراسة اللابة ، حيث تعتبر اللابة عينة من باطن الأرض. ولسوء الحظ، فهى ليست عينه مطابقة تماما ، حيث تختلف اللابة عن الصهارة التى توجد فى الأعماق . فاللابة فقدت بعض مكوناتها من الغازات فى الغلاف الجوى أو المحيط أثناء انبثاقها، كما يمكن أن تفقد الصهارة أو تكتسب بعض المكونات الكيميائية الأخرى أثناء صعودها إلى السطح. وبالرغم من هذه الاختلافات ، فإن الصهارة والمواد الأخرى المنبثقة تمدنا بمعلومات مهمة ، والتى تعتبر مفتاحا لفهم التركيب الكيميائى والحالة الفيزيائية للأجزاء العليا من الوشاح . وتدلنا هذه المواد التى تصلبت على هيئة صخر بركانى ، على الثورة التى كونت هذه الصخور منذ آلاف أو ملايين السنين. ويؤثر التركيب الكيميائى والمعدنى لا للابات فى الطريقة التى تنبثق بها وأشكال التضاريس التى تكوّنها عندما تتصلب.

II. الصخور والغازات التى تقذفها البراكين

يعتقد الكثيرون أن البراكين لا تقذف إلا اللابة . ولكن هذا اعتقاد غير صحيح فى أغلب الأحيان ، حيث تقذف البراكين أثناء الثورة الانفجارية كميات هائلة من الفتات الصخرى والقذائف البركانية والرماد البركانى الدقيق ، والتى لا تقل وفرة عن اللابة . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن كميات كبيرة من الغازات تقذف من البراكين إلى الغلاف الجوى . ونستعرض فيما يلى أنواع المواد المختلفة التى تقذفها البراكين (جدول 1.5) :

أ. الغازات

تحظى الغازات البركانية وطرق تكوّنها بأهمية خاصة، حيث يعتقد أنها هى التى كونت مياه المحيطات وغازات الغلاف الجوى خلال الزمن الجيولوجى ، بالإضافة إلى أنها يمكن أن تؤثر على الطقس والمناخ أيضا . وقد حُلل عديد من الغازات البركانية لتحديد تركيبها الكيميائى ، ووجد أن بخار الماء هو المكوّن الرئيسى للغاز البركانى حيث يمثل 70 إلى 95٪ من مكوناته ، يليه ثانى أكسيد الكربون وثانى أكسيد الكبريت ، بالإضافة إلى كميات ضئيلة من النيتروجين والهيدروجين وأول أكسيد الكربون والكبريت والكلور . وتطلق كل ثورة بركانية كميات هائلة من هذه الغازات (شكل 5.1). وتأتى بعض الغازات البركانية من أعماق الأرض ، لتصعد إلى السطح . وقد تكون بعض الغازات البركانية عبارة عن مياه جوفية أو ماء محيطات دخلت فى دورة جديدة ، أو غاز من الغلاف الجوى أعيد أيضا فى دورة جديدة ، أو غاز محبوس فى صخور تكوّنت فى مراحل مبكرة .

ب. اللابات

تختلف الأنواع الرئيسية للابات والصخور التى تكوّنها تبعا للصهارات التى تتكون منها . حيث تقسم الصهارات والصخور النارية التى نشأت منها إلى ثلاثة أقسام رئيسية ، وهى لابات ريوليتية (فلسية) أو أنديزيتية (متوسطة) أو بازلتية (مافية) تبعا لتركيبها الكيميائى، (انظر الفصل الرابع) . كما تقسم الصخور أيضا إلى صخور متداخلة intrusive (بردت ببطء تحت سطح الأرض وتكون خشنة التحبب) ، وتعرف أيضا بالصخور الجوفية plutonic rocks وصخور منبثقةextrusive (بردت فوق سطح الأرض وتكون دقيقة التحبب) ، وتعرف أيضا بالصخور البركانية

جدول (1.5): المواد التى تقذفها البراكين .

الشكل	الاسم		المميزات
غاز	دخان Fume		غازات بركانية تتكون من الماء وثانى أكسيد الكربون وثانى أكسيد الكبريت وكميات ضئيلة من النيتروجين والهيدروجين وأول أكسيد الكربون والكلورين
سائل	لابات Lavas	آه آه aa	سطح خشن وكتلى
		باهوى هوى pahoehoe	سطح ناعم إلى حبلى
		وسائدية pillow	تتكون تحت سطح البحر من تراكم كتل بيضاوية غير متصلة من البازلت تشبه الأكياس أو الوسائد
صلب	فتات نارى Pyroclasts	رماد ash	< 2 مم
		لويبات (حصى بركانى) cinders	2-64 مم
		كتل blocks	> 64 مم صلبة
		قذائف بركانية bombs	> 64 مم لدنة
	فيوض الفتات النارى Pyroclastic flows		فيوض من غازات ساخنة ورماد وغبار ساخن فى شكل سحابة متوهجة
	لاهار Lahar		تدفق طينى لرواسب الرماد والمواد البركانية المشبعة بالماء فوق منحدرات المخاريط البركانية

volcanic rocks . وتضم الصخور النارية المتداخلة الرئيسية : الجرانيت (فلسى) والديوريت (متوسط) والجابرو (مافى) . وتشمل الصخور المنبثقة الرئيسية المقابلة الريوليت (فلسى) ، والانديزيت الأكثر تواجداً (متوسط) والبازلت (مافى) . ويوضح شكل (4.4) ملخصا لهذه التصنيفات. ويمكن فى هذا الإطار العام أن نتناول أنواع اللابات وكيفية انسيابها وتصلبها.

1. أنواع اللابات

يؤدى تكوّن الأنواع المختلفة من اللابات إلى تكوّن العديد من التضاريس ، مثل الجبال البركانية التى تختلف فى شكلها ، واللابات التى تصلبت وتختلف فى معالمها ، وتعكس هذه الاختلافات الفرق فى التركيب الكيميائى ومحتوى الغازات ودرجة حرارة اللابة . فكلما زاد محتوى السيليكا مثلاً زادت لزوجه اللابة وبطأ انسيابها ، وكلما زاد محتوى اللابة من الغازات ، كان انبثاقها أكثر عنفا .

- **اللابات البازلتية**: تنبثق اللابة البازلتية الداكنة اللون عند درجات حرارة تتراوح بين 1000 °م و 1200°م وهى درجة قريبة من درجه حرارة الأجزاء العليا من الوشاح mantle. وتتميز اللابة البازلتية بأنها سائلة لدرجة كبيرة نتيجة لارتفاع درجه حرارتها ، ومحتواها المنخفض من السيليكا . وتنساب هذه اللابة على المنحدرات بسرعة ولمسافات بعيدة . وعلى الرغم من أن المتوسط الشائع لانسياب اللابات هو عدة كيلومترات فى الساعة ، إلا أنه لوحظ أن بعض اللابات تصل سرعة انسيابها إلى نحو 100 كم فى الساعة . وفى عام 1938م استطاع جيولوجيان روسيان جريئان قياس درجة حرارة الغازات البركانية وجمع عينات منها

بوقوفهما فوق كتلة متصلبة تطفو فوق لابة من البازلت المنصهر الذى يتحرك كنهر جار . وكانت درجة الحرارة عند سطح الكتلة المتصلبة 300°م ، بينما كانت درجة حرارة نهر البازلت 870°م. وقد سجلت حالات انسابت فيها اللابة لمسافة تزيد على 50 كم من مصدر انبثاقها . وتختلف اللابات البازلتية المنسابة تبعا للظروف التى انبثقت تحتها. ونذكر هنا بعض الأنواع المهمة لتلك اللابات البازلتية:

- **بازلت فيضى** : وفيه تنتشر اللابة البازلتية السائلة التى تنبثق فوق أرض مستوية على هيئة فرش رقيقة ، مثل فيضان من اللابة (شكل 2.5) . وغالبا ما تراكم الفيوض المتشابهة فى هيئة هضاب بازلتية ضخمة تسمى البازلت الفيضى **flood basalt** أو الهضاب البازلتية **basaltic plateaus** مثل تلك الموجودة فى هضبة كولومبيا فى أوريجون وواشنطن، وكذلك فى هضبة الدكن غرب الهند ، وتلك التى تغطى مساحات واسعة من الدرع العربى فى غرب شبه الجزيرة العربية والمعروفة بالحرات (شكل 2.5).

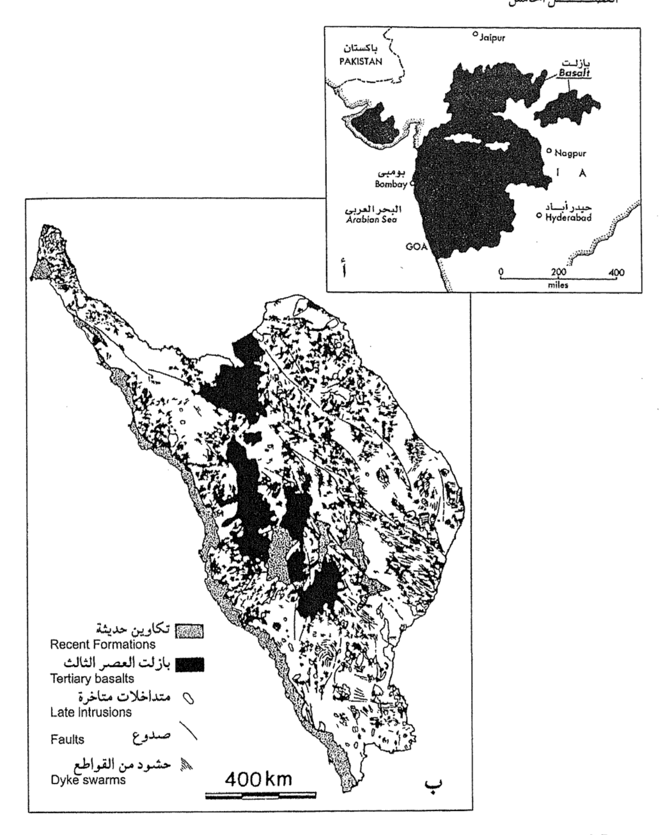
- **باهوى هوى وآه آه** : تقسم اللابة البازلتية التى تبرد أثناء انسيابها على المنحدرات إلى نوعين تبعا لشكل السطح المتكون ، وهما باهوى هوى**pahoehoe** و آه آه **aa** (شكل 3.5) .

يتكون الباهوى هوى (الكلمة فى لغة هاواى تعنى حبليةropy) حينما تنتشر لابة سائلة على هيئة فرش ، ويتجمد سطحها ليكوّن قشرة رقيقة زجاجية مرنة تسحب وتجدل لتكوّن طيات ملتفة تشبه الحبل ، بينما يستمر السائل المنصهر فى التدفق أسفل هذه الطبقة المرنة المتجمدة (شكل 3.5) .

أما الآه آه aa فهو ما ينطق به الشخص الغافل (غير الحذر) عندما يتجرأ ويمشى حافى القدمين على لابة تشبه الأرض المحروثة حديثا . والآه آه هى لابة فقدت محتواها من الغازت وأصبحت بالتالى أكثر لزوجة عن الباهوى هوى . ولذلك فهى تتحرك ببطء ، مما يؤدى إلى تكون طبقة سطحية أكثر سمكا . وبينما تستمر اللابة فى التحرك ، فإن القشرة السطحية السميكة تتكسر إلى كتل كبيرة خشنة ذات نتوءات حادة (شكل 3.5) ؛ حيث تتراكب تلك الكتل فوق الجزء اللزج مما يؤدى إلى تراكم مقدمة شديدة الانحدار من الكتل الكبيرة المزواة التى تتقدم مثل جرار متحرك .

وحينما تنساب لابة بازلتية على المنحدرات فإنها تأخذ عادة شكل الباهوى هوى بالقرب من مصدر خروج اللابة ، حيث تكون اللابة مازالت سائلة وساخنة ، بينما تأخذ اللابة شكل الآه آه فى المناطق الأبعد عن مصدر الصهارة على المنحدرات ، حيث يتعرض سطح اللابة المنسابة للهواء البارد لمدة طويلة وتتكون طبقة خارجية سميكة .

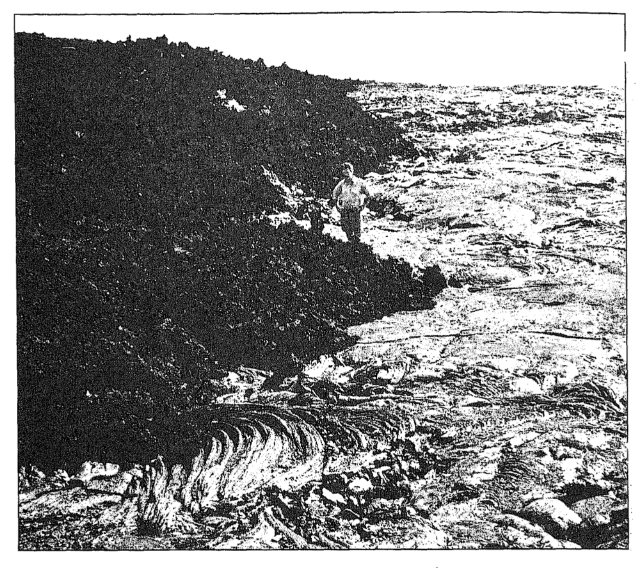
- **لابة وسائدية**: لاحظ الجيولوجيون أن اللابات الوسائدية **pillow lava** تتكون على قاع المحيط فى هاواى ثم يقوم ماء البحر بتبريدها بسرعة . ويتكون التركيب الوسائدى على قاع البحر بعيدا عن مخرج اللابة البازلتية عند حيود وسط المحيط ، حيث تنخفض درجة حرارة اللابة المنسابة . ويشير مصطلح بازلت وسائدى pillow basalt إلى تركيب معين يتميز بوجود كتل غير متصلة من البازلت ، تكون وسائدية الشكل تشبه الأكياس ، يتراوح قطرها بين بضعة سنتيمترات ومتر أو أكثر (شكل 4.5 أ، ب) . ويتكون التركيب الوسائدى عندما تبرد ألسنة من اللابة البازلتية المنصهرة ، ويتقسى سطحها بالتبريد المفاجئ ، وتتكون قشرة خارجية خشنة ، بينما تبرد اللابة داخل هذه القشرة بمعدل أكثر بطئا . ولذلك فإن الجزء الداخلى للوسائد يتكون من نسيج متبلور ، بينما تتكون القشرة الخارجية من نسيج زجاجى عديم البلورات



شكل (**2.5**): البازلت الفيضى:

(أ) الهضبة البازلتية فى غرب الهند ، (ب) الهضاب البازلتية **basaltic plateaus** فى الدرع العربى ، والمعروفة بالحرات .

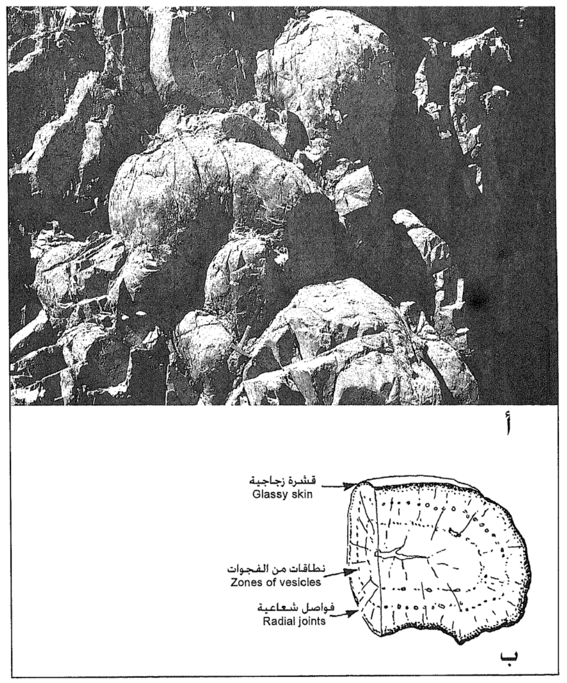
(After Genna, A. Nehlig, P., Le Coff, E., Guerrot, C., and Shanti, M., 2001: Proterozoic crustal thinning in the Arabian Sheild: Geologic and metallogenic implications. Jour. Struct. Geol.).



شكل (3.5): انسابات لابة من نوعى الآه آه aa (يسار) وباهوى هوى pahoehoe (يمين) واللتان انبثقتا من بركان كيلوى Kilauea Volcano فى هاواى عام 1973م . وتكوّن لابة الباهوى هوى طيات رقيقة ملتفة كالحبل ، بينما تكوّن لابة الآه آه كتلا غير ملساء ذات نتوءات حادة يبلغ سمكها نحو 3 إلى 4 أمتار ، وهى تغطى لابة الباهوى هوى الأكثر نعومة وتلألأ .
.(After Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York)

بسبب تبردها بسرعة (شكل 4.5 ب). وتحدث كسورا فى هذا السطح الخارجى ، مما يؤدى إلى تكوّن فتحات تخرج منها الصهارة التى مازالت فى حالة سائلة وتتسرب للخارج. ثم تتقسى هذه القطعة الجديدة البارزة بالتبريد المفاجىء ويتشقق سطحها ، وهكذا تستمر العملية ويتكون فى النهاية ركام متكدس من أجسام تشبه أكياس الرمل . ومعظم اللابات التى تنساب على القشرة المحيطية تكوّن بازلتا وسائديا . أما بالقرب من الكسور البازلتية عند حيود وسط المحيط فإن درجة حرارة اللابة تكون أعلى ، وتنساب فرش رقيقة من اللابة ليتكون سطحا زجاجيا نتيجة للتبريد المفاجىء ، وتتكدس الطفوح المنسابة لتكون تراكها من الفرش البازلتية التى لا يزيد سمك كل فرش منها على 20 سم تقريبا .

- **اللابات الريوليتية** : يتميز الريوليت الفاتح اللون وكذلك اللابة الريوليتية بأنها تكون أكثر فلسية ، كما تكون درجة انصهارها أقل من اللابة البازلتية ،



شكل (4.5): لابة وسائدية pillow lava تكونت على قاع المحيط تحت الماء ، والتى تكون أكثر الصخور انتشارا على الأرض .

(أ) لابة وسائدية فى أوفيوليت وادى غدير ، التابع للبروتيروزوى المتأخر - جنوب الصحراء الشرقية - مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية) .

(ب) قطاع فى لابة وسائدية يظهر التركيب الداخلى للوسادة والذى يتكون من نسيج متبلور، بينما تتكون القشرة الخارجية من نسيج زجاجى غير متبلور ، تحدث به فواصل أو كسور شعاعية . لاحظ وجود نطاقات من الفجوات تكونت نتيجة لخروج الغازات .

وتنبثق عند درجات حرارة تتراوح بين 800° و 1000° م . وتكون اللابة الريوليتية أكثر لزوجة من اللابة البازلتية نتيجة انخفاض درجة حرارتها ومحتواها العالى من السيليكا. وتتحرك اللابة الريوليتية بمعدل أبطأ بمقدار العشر عن اللابة البازلتية ، ولذلك فهى تقاوم الانسياب ، وتميل إلى أن تتراكم فى هيئة رواسب سميكة منتفخة تشبه البصلة bulbous .

- **اللابات الأنديزيتية** : يتميز الأنديزيت ، والذى يحتوى على محتوى متوسط من السيليكا بين كل من اللابة الفلسية والمافية ، بصفات تقع بين تلك المميزة لكل من البازلت والريوليت.

2. أنسجة اللابات

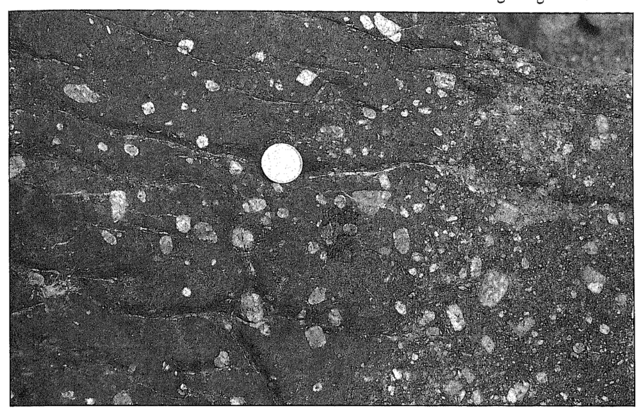
تتميز اللابات بوجود مظاهر أخرى تعكس ظروف الحرارة والضغط التى تكونت تحتها. فيمكن أن يتكون نسيج زجاجى أو دقيق التحبب إذا كان التبريد سريعا ، أو نسيج أكثر خشونة إذا كان التبريد بطيئا . ويسمى النسيج الذى يتكون من حبيبات معدنية كبيرة تعرف بالبلورات الظاهرة phenocrysts فى أرضية groundmass مكونة من حبيبات صغيرة من المعادن **بالنسيج البورفيرى porphyritic texture** (شكل 5.5). ويمكن أن يؤدى انخفاض الضغط فجأة أثناء صعود اللابة وتبريدها إلى تكوّن فقاعات صغيرة . وتحتوى اللابة أساسا على غازات، كما تحتوى زجاجة المياه الغازية المغلقة على الصودا . وعندما تصعد اللابة ، يقل الضغط من فوقها ، كما ينخفض الضغط عن قطرات الصودا حينما يفتح غطاء زجاجة المياه الغازية . وكما يكوّن ثانى أكسيد الكربون فى الصودا فقاعات نتيجة انخفاض الضغط ، فإن بخار الماء والغازات الأخرى الذائبة فى اللابة تهرب منها وتكوّن فراغات أو كهوف صغيرة غازية أو **فجوات vesicles** تشبه الرغوة (شكل 6.5) . ويشير النسيج الرغوى frothy texture فى اللابة المتصلبة إلى الأصل البركانى للصخر. ويمثل صخر البيومس pumice (الحجر الخفاف) أحد أمثلة الصخور البركانية الريوليتية التى تتميز بوجود عدد هائل من الفجوات ، لدرجة أن بعض صخور البيومس تطفو فوق سطح الماء .

ج. الرواسب الفتاتية النارية

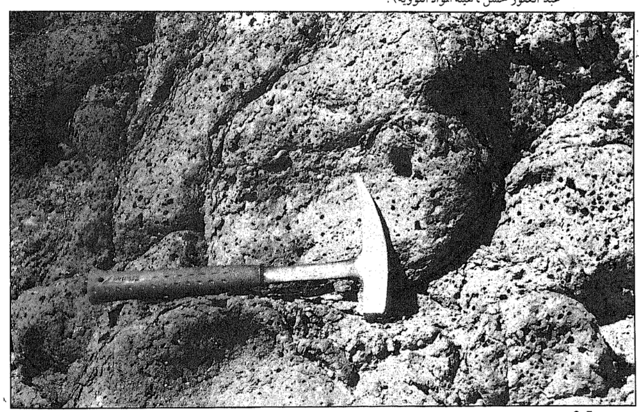
تؤثر المياه والغازات الذائبة فى الصهارات كثيرا على نوع الثورة البركانية . ويؤدى الضغط الحابس confining pressure للصخور التى تعلو البراكين ، قبل حدوث الثورة ، إلى احتفاظ اللابات بالمواد الطيارة من الهروب . وعندما تصعد الصهارة بالقرب من السطح وينخفض الضغط ، فإنه يتم التخلص من المواد الطيارة تحت قوى انفجارية ، تهشم اللابة وأى صخور أخرى صلبة تعلوها إلى كسرات ذات أحجام وأشكال وأنسجة مختلفة. وتميز الثورات الانفجارية على الأخص اللابات الريوليتية والأنديزيتية اللزجة والغنية بالغازات .

1. المقذوفات البركانية

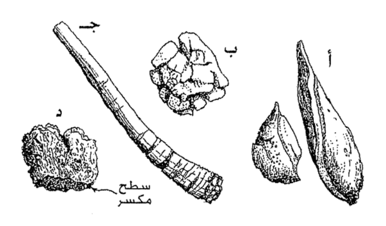
تسمى أى مواد صخرية بركانية مفتتة تقذف فى الهواء **بالفتات النارى pyroclasts** (يستمد المصطلح من الكلمات اليونانية pyro وتعنى نارا أو حرارة وklastos وتعنى مكسرا أومفتتا) . وتسمى الصخور المتكونة من الفتات النارى **بصخور فتاتية نارية pyroclastic rocks** . كما تسمى أحيانا الرواسب المكوّنة من الفتات النارى **بالتفرا tephra**. ويستخدم مصطلح تفرا كمصطلح شامل لكل الفتات النارى فى الهواء ، ويشمل كسرات من الصهارة المتصلبة حديثاً سواءً كانت صخورا أو معادن أو زجاجا ، بالإضافة إلى كسرات من الصخور القديمة المكسرة . وتشمل التفرا الفتات النارى الذى يتساقط مباشرة على الأرض ، وذلك التى يتحرك على الأرض كجزء من فيض ساخن متحرك .



شكل (**5.5**): ريوليت يتميز بنسيج بورفيرى porphyritic texture يتكون من حبيبات معدنية كبيرة تعرف بالبلورات الظاهرة phenocysts فى أرضية مكوّنة من حبيبات صغيرة من المعادن. وادى عطا الله – الصحراء الشرقية – مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية) .



شكل (**6.5**): بازلت من جبل القطرانى ـ الصحراء الغربية – مصر ، به فجوات vesicles نتيجة خروج الغازات الذائبة فى اللابة ، فتترك فراغات صغيرة مكانها .



شكل (7.5): الأشكال المختلفة للقذائف (القنابل) البركانية volcanic bombs . (يتراوح عرض كل القذائف بين 4.5 و 10 سم).
(أ) قذائف تشبه اللوز almound-shaped bombes.
(ب) قذيفة لها بنية قشرة الخبز breadcrust bomb (تكسرت القشرة نتيجة تمدد اللب الممتلئ بالفجوات).
(ج) قذيفة شريطية ribbon bomb قذيفة سكوريا لها سطح مكسر.
(د) قذيفة سكوريا لها سطح مكسر.

ويتنوع حجم وشكل الفتات النارى بدرجة كبيرة . وتسمى الأجسام التى قذفت كقطع من اللابة وأصبحت مستديرة ، حيث تتشكل وتبرد فى الهواء ، بالقذائف البركانية **bombs** (شكل 7.5) . أما الكسرات التى نشأت من صخور بركانية متصلدة سابقاً ، فإنها تكون كسرات كتلية زاوية ، تعرف **بالكتل blocks** ، أما اللوبيات (الحصى البركانى) **lapillis** (من الإيطالية بمعنى الأحجار الصغيرة) فتكون أصغر حجما من القذائف البركانية والكتل . ويتراوح حجم القذائف البركانية بين حجم منزل اندفع لأكثر من 10 كم فى الثورات العنيفة ، بينما يكون الرماد **ash** البركانى دقيقاً لدرجة أنه يبقى عالقا فى الهواء وينتقل لمسافات طويلة. وقد تم تتبع أثر الرماد البركانى بعد أسبوعين من انفجار فى مونت بينا توبو فى الفلبين فى كل أنحاء العالم عن طريق الأقمار الصناعية عام 1991م . ويوضح جدول (2.5) المصطلحات المستخدمة فى وصف الأحجام المختلفة للفتات النارى.

ويتساقط الفتات البركانى عاجلاً أم آجلا ، ويكوّن عادة رواسب بالقرب من المصدر البركانى . كما تلتحم الكسرات الساخنة اللزجة مع بعضها بعضا (أو تتحجر) أثناء التبريد . وتصنف الصخور المتكونة من الفتات النارى حسب حجم الحبيبات التى يتكون منها الصخر ، (جدول 2.5) . وتسمى الصخور التى تتكون من قذائف بركانية يزيد قطرها عن 64 مم **بالأجلومرات agglomerate** ، وتلك التى تتكون من كتل كبيرة **بالبريشيا البركانية volcanic breccia**. أما الصخور التى تتكون من كسرات يقل قطرها عن 64 مم فتسمى **بالطف البركانى volcanic tuff** . وتسمى الصخور التى يتراوح قطر الحبيبات فيها بين 64 مم و 2 مم بطف اللوبيات lapilli tuff ، بينما تلك التى يقل قطر حبيباتها عن 2 مم بطف الرماد ash tuff .

جدول (2.5): التصنيف الحجمي للمواد الفتاتية النارية (التفرا) والصخور الفتاتية النارية (After Raymond, L. A. 1995)

متوسط قطر الحبيبة (مم)	تفرا (مواد فتاتية نارية غير متصلدة)	الصخر الفتاتي الناري (مواد متصلدة)
أكبر من 64	قذائف بركانية bombs ـ كتل blocks	أجلومرات agglomerate- بريشيا بركانية volcanic breccia
64 - 2	لوبيات (حصى بركاني) lapillis	طف اللوبيات lapilli tuff
أقل من 2	رماد ash	طف الرماد ash tuff

2. فيض الفتات النارى

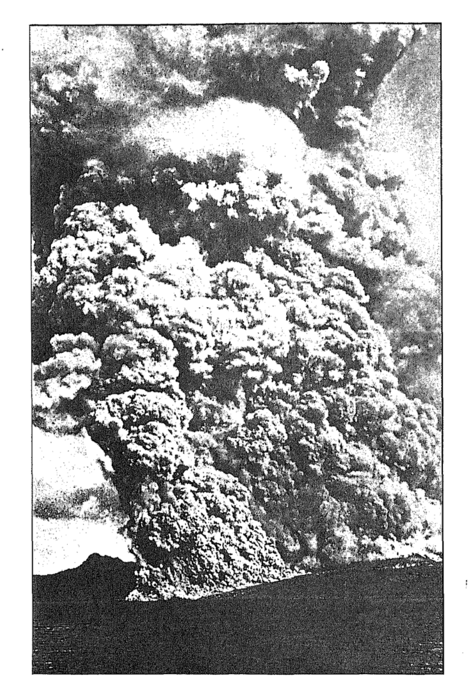
قد يكون أحد أشكال الثورات البركانية DM مثيرا ومذهلا ، وغالبا ما يكون مدمرا ، حيث يقذف البركان غازات ورمادا وغبارا ساخنا فى هيئة سحابة متوهجة تندفع على المنحدرات بسرعة قد تصل إلى نحو 200 كم فى الساعة . وتحمل الغازات الساخنة الفتات الصلب لأعلى بعيدا عن سطح الأرض ، بحيث تجعل مقاومة الاحتكاك قليلة ، ويعرف هذا الفيض بفيض الفتات النارى pyroclastic flow .

كما يطلق أيضا على الفيض اسم السحابة المتوهجةnuée ardente (وهى كلمة فرنسية تعنى عاصفة متوقدة) . وتتميز السحابة المتوهجة بطاقة تتجمع من مصادر أربعة هى الانفجار الأولى والجاذبية والغاز الهارب من قطع الصهارة المحمولة فى الغازات والتى تنفجر مثلما يحدث فى حبات الفشار ، وأخيرا تسخين الهواء المخلوط فى السحابة المتدفقة نتيجة تحركه بعيدا أسفل المنحدرات .

وفى صباح يوم 8 مايو عام 1902م صعدت إلى أعلى فوهة بركان فى جبل مونت بيليه Mont Pelée فى جزيرة مارتينيك فى البحر الكاريبى كتلة ضخمة من صهارة ممتلئة بالغاز ودرجه لزوجتها عالية جداً . وحدثت انفجارات شديدة لها صوت يشبه صوت آلاف المدافع ، نتيجة لانفجار فقاقيع الغازات المحبوسة، مما ترتب عليه تقطع الصهارة إلى قطع صغيرة . ثم تحرك هذا الفيض من الفتات النارى المحتوى على الغازات والكسرات البركانية المتوهجة على المنحدرات بسرعة تماثل سرعة الأعاصير ، حيث وصلت السرعة إلى 160 كم فى الساعة . وخلال دقيقة واحدة غطى خليط الغازات والرماد والغبار البركانى مدينة سانت بيير وقتل 28000 شخصا . وقد قدرت درجة الحرارة عند فوهة البركان بحوالى 1200^{o} م ، بينما كانت درجة الحرارة المتوهجة تزيد على 700^{o} م ، وذلك عند مهاجمتها لمدينة سانت بيير. وقد حدثت الوفاة لهذا العدد الضخم من البشر بسرعة ، بسبب الاصطدام بالمكونات البركانية الصلبة أو لاستنشاق الغازات الساخنة جدا أو الاحتراق .

وقد أزالت السحابة المتوهجة أسقف المنازل ، وهدمت معظم الحوائط التى كانت متعامدة على طريقها . كما تسببت فى التواء القضبان المعدنية . وخلال دقائق معدودة تحولت مدينة سانت بيير المليئة بالمسطحات الخضراء إلى مدينة يحوطها الخراب والدمار، وتتغطى بحوالى 30 سم من الرماد البركانى ذى اللون الرمادى ، وأيضا رماد مختلط بالطين يلطخ جدران المنازل وجذوع الأشجار.

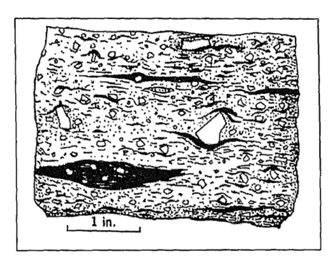
وقد صورت سحابة متوهجة من مونت بيليه بعد عدة أشهر من السحابة السابقة (شكل 8.5). كما شوهد عديد من السحابات المتوهجة الصغيرة فى مايو 1980م ، أثناء النشاط البركانى فى جبل سانت هيلين بواشنطن ، حيث هبط الجانب الأيمن من الجبل إلى الغابة فى أقل من ثلاث دقائق .



شكل (8.5): انفجار سحابة ضخمة متوهجة من مونت بيليه Monte Pelée بالبحر الكاريبي، بعد عدة أشهر من سحابة مماثلة من الغازات الساخنة والرماد البركاني ، والتي دمرت سانت بيير عام 1902م وقتلت 28000 نسمة خلال دقائق .
(After Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويسمى الراسب ردىء الفرز المتكون من الفتات الناری بإجنمبريت **ignimbrite** . كما يطلق أيضاً مصطلح إجنمبريت على الصخر المتكون من هذا الراسب نتيجة التحام الحبيبات الساخنة . كما يطلق أيضا مصطلح الطف الملحوم **welded tuff** على الصخر المتكون من رماد ساخن جدا ، وفی حالة لدنة ، بحيث تنصهر الحبيبات المنفصلة مع بعضها بعضا، وتكوّن حجرًا فتاتيًا ناريًا غنيًا بالزجاج ، حيث تلتحم

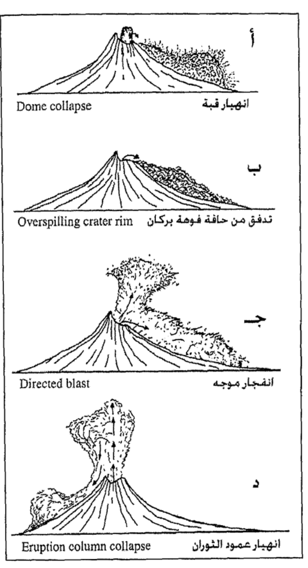
الشظايا الزجاجية تحت التأثير المشترك لكل من الحرارة الكامنة فى الشظايا وثقل المواد المتساقطة ، وأيضا فصل الغازات الساخنة . ويتكون هذا الصخر عادة من فتات نارى غنى بالسيليكا ، ويتميز بنسيج تخطيطى (شكل 9.5) . وتتكون فيوض الفتات النارى بعدة طرق ، (شكل 10.5) ، منها :



شكل (9.5): طف ريوليت ملتحم يتميز بنسيج مخطط ، ويحتوى على عدسات زجاجية سوداء تلتحم تحت تأثير الحرارة وثقل المواد المتساقطة . وتلتف تلك العدسات حول كسرات صخرية مزواة (جبل بير ، ولاية نيفادا الأمريكية) .

1- انهيار عمود الثورة : ينشأ فيض الفتات النارى عندما ينهار عمود الثورة eruption column collapse، حين تحدث ثورة وانفجار رأسى ، ويقذف الرماد البركانى إلى ارتفاع قد يصل إلى 10 كم أو أكثر . وعادة ما تنهار هذه السحابة الثقيلة من الرماد والغاز وتتدفق عبر منحدرات البراكين فى شكل فيض فتات بركانى يتحرك بسرعة وعنف، ومثال ذلك ما حدث فى جبل ميون فى الفلبين عام 1968 م .

2- انهيار قبة من اللابة: قد يحدث فيض الفتات النارى بسبب انهيار قبة اللابة dome collapse ، مثلما حدث فى جبل أونزين باليابان عام 1991م . حيث بدأت قبة اللابة فى النمو المفاجئ عام 1990 م ، حتى وصل ارتفاعها إلى حوالى 90 مترا فوق حافة فوهة البركان ، ثم حدثت عدة انهيارات لكتل ضخمة من قبة اللابة ، واندفعت على المنحدرات فى هيئة فيض فتات بركانى متوهج .



شكل (10.5): طرق تكوّن فيوض الفتات النارى pyroclastic flows

(أ) انهيار قبة من اللابة ، جبل أونزن عام 1991م .

(ب) تدفق من حافة فوهة بركان ، جبل مونت بيليه ، 1902-1903م .

(جـ) انفجار مباشر ، جبل سانت هيلين عام 1980م .

(د) انهيار عمود الثورة column collapse ، جبل ميون فى الفلبين عام 1968م.

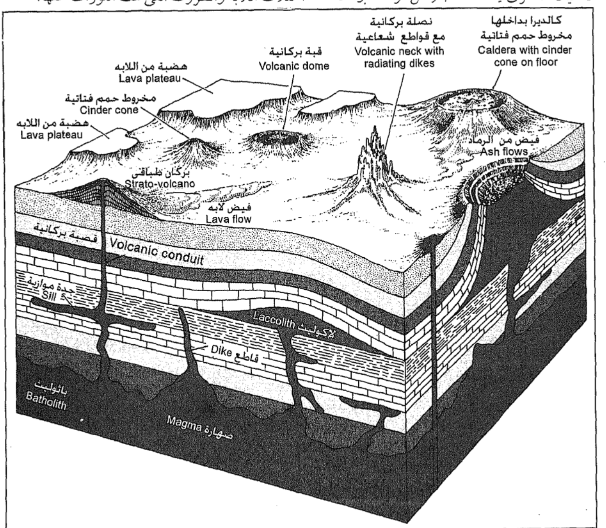
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

3- **التدفق من حافة فوهة:** ويبدأ فى هذه الطريقة تدفق الفتات النارى على هيئة رماد وغاز ساخن من حافة فوهة البركان بطريقة مشابهة لقدر يغلى ويتدفق محتواه على الموقد. ومثال ذلك ما حدث فى جبل مونت بيليه فى الفترة 1902-1903م والفترة 1929-1932م.

4- **الانفجار المباشر:** قد يحدث فيض الفتات النارى بالانفجار المباشر، مثلما حدث فى جبل مونت بيليه بمارتينيك فى البحر الكاريبى عام 1902 م، حيث بدأت صهارة عالية اللزوجة جدا فى ملأ فوهة البركان، وقد يحدث أحيانا أن يتدفق الفتات النارى الساخن جداً من فوهة البركان، وفى بعض الأحيان الأخرى يحدث انفجار من فوهة البركان.

III. أنواع الانبثاقات ومعالمها

بعد أن استعرضنا الأنواع المختلفة للمواد البركانية التى انبثقت أو قذفت من داخل الأرض، فإننا يمكن أن نفحص عن قرب أنواع الانبثاقات والمكوّنات المميزة لها. ولاتكون الثورات البركانية دائماً مخروطا متماثلا مهيبا. وتمثل الطبقات الرتيبة والمملة من البازلت والتى تكوّن هضبة كولومبيا فى واشنطن وأوراجون، والتى تغطى مئات الآلاف من الكيلومترات المربعة، نوعاً آخر من البراكين. وتختلف المعالم البركانية فى الشكل (شكل 11.5)، نتيجة اختلاف اللابة والظروف التى تمت الثورات تحتها.



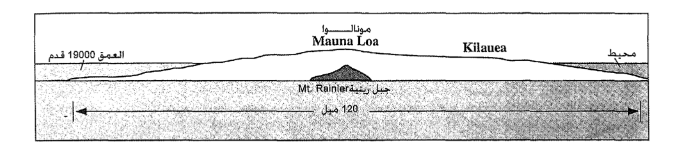
شكل (11.5): أشكال تواجدات الصخور البركانية. كما يوضح الرسم بعض أشكال الصخور المتداخلة.

(After Schmidt, R.G. and Shaw, H.R., 1972: Atlas of Volcanic Phenomena. U.S. Geological Survey).

أ. الانبثاقات المركزية

تكوّن الانبثاقات المركزية **central eruptions** معظم أشكال البراكين الشائعة . حيث يتشكل الجبل البركانى على هيئة مخروط . وتطلق هذه الثورات اللابة أو المواد الفتاتية البركانية من مخرج مركزى **central vent** ، وهو عبارة عن فتحة فى مركز المخروط البركانى تقريباً عند قمة قناة صاعدة من غرفة الصهارة ، تندفع من خلالها المواد لتنبثق على سطح الأرض (شكل 1.5وشكل 14.5)....

وعلى الرغم من أنه يرتفع أربعة كيلومترات فقط فوق مستوى سطح البحر ، إلا أنه يعتبر فعليا أطول تركيب فى العالم ، حيث يرتفع فوق قاع البحر عشرة كيلومترات، بينما يبلغ قطر قاعدته نحو 120 كم . ولقد وصل بركان مونا لوا إلى حجمه نتيجة تراكم آلاف التدفقات اللابية على امتداد عدة ملايين من السنين . حيث يبلغ سمك كل واحدة من هذه التدفقات بضعة أمتار. وتتكون جزيرة هاواى من مجموعة من البراكين الدرعية النشيطة المتراكمة فوق بعضها بعضا على مر السنين حتى برزت فوق قاع المحيط .



شكل (12.5): بركان درعى ، مثل مونا لوا Mauna Loa فى هاواى ، حيث يكون قطر قاعدته أكبر من ارتفاعه . ويوضح الشكل جبل رينيه فى واشنطن وهو بركان مركب composite volcano للمقارنة، حيث يكون ارتفاعه كبيرًا مقارنة بالقاعدة.

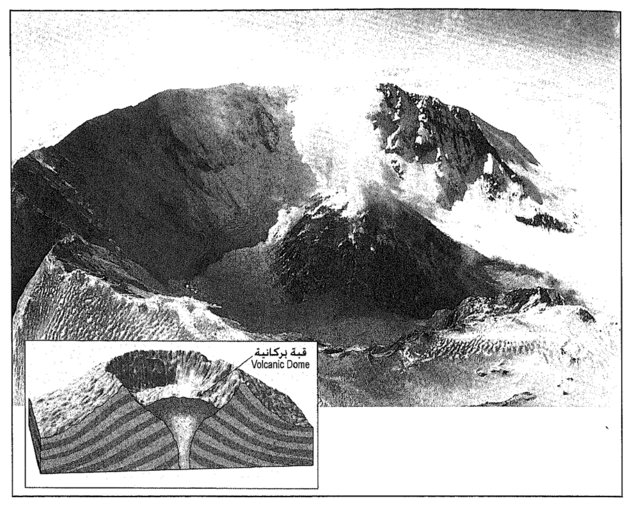
(After Tiling,R.I. et al.,1987: Eruptions of Hawaiian Volcanoes, U.S. Geological Survey).

1. البراكين الدرعية

يتكون مخروط البركان نتيجة التدفقات المتتابعة من اللابة من مخرج مركزى . وتتدفق اللابة بسهولة وتنتشر فى حالة اللابة البازلتية . أما فى حالة التدفقات الوفيرة والمتكررة ، فإنها تكوّن بركانا درعى الشكل يأخذ شكل القبة تقريباً ، عريض يبلغ محيطه عشرات الكيلومترات ويزيد ارتفاعه على كيلومترين ، وتكون الانحدارات لطيفة نسبيا خاصة بالقرب من القمة. ويعتبر بركان مونا لوا Mauna Loa فى هاواى أحد الأمثلة التقليدية لبركانى درعى **shield volcano** (شكل 12.5) .

2. القباب البركانية

تتميز اللابات الفلسية (الريوليتية) ، على عكس اللابات البازلتية ، بأنها لزجة لدرجة أنها تتدفق بصعوبة بالغة . وتكون اللابة الفلسية عادة فى هيئة قبة بركانية **volcanic dome**، وهى عبارة عن كتلة مستديرة من الصخور ، ذات جوانب شديدة الانحدار. وتبدو القبة البركانية كما لو كانت تدفقت من مخرج ، مع عدم القدرة على الانتشار الجانبى . حيث تقوم القباب غالبا بغلق مخرج اللابات ، مما يؤدى إلى حبس الغازات وزيادة الضغط ، فيحدث انفجار يؤدى إلى



شكل (**13.5**): القباب البركانية volcanic domes وهى عبارة عن كتل مستديرة من لابة ربوليتية (فلسية) تكون لزجة لدرجة أنها تتراكم فوق فوهة البركان بدلا من الانسياب على جوانبه . ويوضح الشكل هنا قبة فى مرحلة نمو داخل فوهة بركان جبل سانت هيلين .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

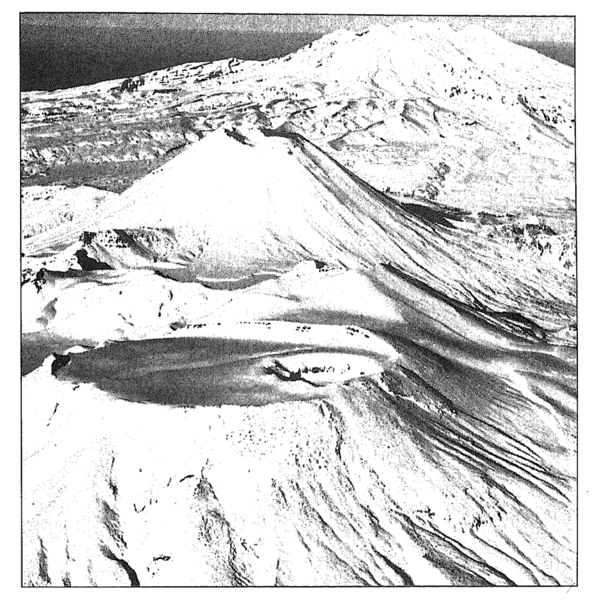
تحطم القبة إلى كسرات . ومثال ذلك ، ما حدث فى انفجار جبل سانت هيلين عام 1980م (شكل 13.5) .

3. مخاريط الحمم الفتاتية

حينما تقذف المخارج البركانية فتاتا ناريا ، فإن الكسرات الصلبة تبنى مخروطا من الفتات النارى يعرف بمخروط الحمم الفتاتية **cinder cone** . ويتحدد بروفيل المخروط حسب أقصى زاوية استقرار يمكن أن يبقى عندها الحطام مستقرا قبل أن ينهار على المنحدرات. وتكون الكسرات الأكبر التى تسقط بالقرب من القمة انحدارات حادة ، إلا أنها تكون مستقرة . أما الكسرات الدقيقة فإنها تحمل بعيدا عن مخرج البركان ، وتكوّن منحدرات لطيفة عند قاعدة المخروط . ويعكس المخروط البركانى التقليدى ذو السطح المقعر ، وحيث يوجد المخرج عند القمة ، هذا التغير فى الانحدار .

4. البراكين المركبة

تتكون البراكين المركبة **composite volcanoes** حينما يقذف بركان لابةً مع الفتات النارى ، فتتبادل فيوض اللابة مع طبقات الفتات



شكل (**14.5**): صورة جوية لبراكين تونجاريرو ونَجوروهو وروبيهو **Tongariro, Ngauruhoe and Ruapehu volcanoes** فى نيوزيلنده . وتظهر فوهة بركان تونجاريرو فى مقدمة الصورة حيث يبلغ قطرها 1.3 كيلومتر ، والذى يمثل حجمًا وسطًا بين فوهة بركان كبيرة وكالديرا صغيرة . ويلاحظ وجود فوهة أخرى صغيرة داخل تلك الفوهة الكبيرة . ويمثل مخروط بركان نجوروهو فى وسط الصورة مثالاً نموذجيًا لبركان طباقى stratovolcano نشط له فوهة مركزية عند قمته . ويمثل بركان روبيهو فى خلفية الصورة بركانا طباقيا آخر .
(After Schmidt, R.G. and Shaw, H.R., 1972: Atlas of Volcanic Phenomena. U.S. Geological Survey).

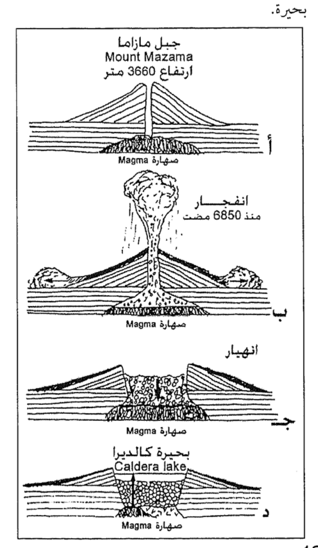
النارى لتكوّن بركانا مركبا مقعر الشكل ، أو بركانا طباقيا **stratovolcano** (شكل 1.5) . ويمثل هذا النوع أكثر الأنواع شيوعا من البراكين الكبيرة ، مثل: بركان فوجى ياما Fujiyama فى اليابان ، وبراكين فيزوف Vesuvius وإتنا Etna فى إيطاليا ، وبركان نجوروهو فى نيوزيلندة (شكل 14.5).

5. فوهات البراكين والمعالم البركانية الأخرى

فوهات البراكين: يوجد على قمة معظم البراكين ، فوق مخرج البركان ، حفرة على شكل منخفض دائرى ذات شكل قمعى تعرف بفوهة البركان crater ، تقذف من خلالها الغازات والفتات البركانى واللابة (شكل 1.5 وشكل 14.5). وتتجاوز اللابة المتدفقة

جدران فوهة البركان أثناء انبثاق اللابة من البركان . وعند توقف الثورة تغوص اللابة المتبقية فى فوهة البركان مرة أخرى فى مخرج البركان وتتصلب . وحينما تحدث الثورة التالية ، تتفجر تلك المواد خارج فوهة البركان فى هيئة انفجار فتاتى بركانى . وتملأ فوهة البركان بعد ذلك جزئيا بالحطام الذى يتساقط داخل الفوهة . ولأن حوائط فوهة البركان تكون حادة الانحدار فإنها ربما تسقط أو يتم تعريتها مع مرور الوقت . وبهذه الطريقة ، فإن قطر فوهة البركان قد يزيد عدة مرات عن قطر مخرج البركان ، بينما تبلغ مئات الأمتار عمقا . فمثلاً يبلغ قطر فوهة جبل إتنا فى صقلية حاليا نحو 300 م، بينما تبلغ850 مترا عمقا .

الكالديرات: تصبح غرفة الصهارة فارغة كليا أو جزئيا ، بعد الثورة العنيفة التى تندفع فيها أحجام كبيرة من الصهارة من غرفة الصهارة المتواجدة على بعد عدة كيلومترات قليلة تحت مخرج البركان ، ثم يهبط ببطء سقف غرفة الصهارة غير المدعم تحت تأثير وزنها وينهار من خلال حلقة من الكسور الرأسية شديدة الانحدار ، تاركا منخفضا كبيرا على شكل حوض ، أكبر بكثير من فوهة البركان ، يسمى **كالديرا caldera** (شكل 15.5). وتتميز الكالديرات بمعالمها المميزة ، حيث يتراوح قطرها بين بضعة كيلومترات و 50 كم أو أكثر . ويعتقد بعض الجيولوجيين أن الكالديرا تتكون بسبب انفجار هائل فى البركان ينسف قمته ، بينما أظهرت البحوث ورسم الخرائط الجيولوجية لأنماط التصدع حول الكالديرات أن الكالديرا تحدث نتيجة انهيار سقف غرفة الصهارة ، كما ذكرنا سابقا. وقد تتراكم مياه فى الكالديرا لتكون بحيرة.



شكل (**15.5**): مراحل تكون الكالديرا **caldera**

(أ) جبل مازاما **Mount Mazama** يرتفع عاليا نحو **3660** مترا .

(ب) حدث انفجار ضخم منذ **6850** سنة أدى إلى اندفاع صهارة عالية اللزوجة وفتات بركانى .

(جـ) بعد توقف النشاط البركانى ، والذى اندفع خلاله حجم هائل من الصهارة يقدر بأربعين كيلو مترا مكعبا ، أصبحت غرفة الصهارة فارغة كليا أو جزئيا مما أدى إلى انهيار سقف غرفة الصهارة خلال حلقات من الكسور الرأسية شديدة الانحدار ، والتى تكوّن الكالديرا .

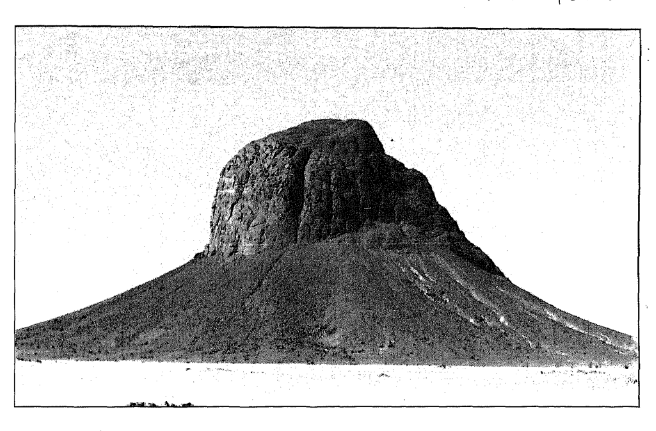
(د) تتكون بحيرة كالديرا **Crater Lake** عندما يملأ التجويف بالماء .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

انفجـارات المـاء البركـاني: عنـدما تقابـل صـهارة ساخنة غنية بالغاز ماءا جوفيا أو ماء بحر ، تنشأ كميات ضخمة من بخار الماء الشديد السخونة تصحبها الطين والمواد الأخرى ، دون توهج وتسبب ما يعرف **بانفجار المـاء البركـانى (انفجـار فريـاتى) phreatic explosion** . ومـن هـذا النمـوذج انفجـار بركـان كراكاتو Krakatoa فى إندونيسيا عام 1883 م ، وهـو أحـد أكثـر الانفجـارات البركانيـة تحطـيما وتخريبـا فى التاريخ.

دياتريم (ثاقبة بركانية): عندما تهـرب مـادة سـاخنة من الأعماق الداخلية للأرض فى صـورة انفجـار ، فـإن مخرج البركان والأنبوب المغذى أسفله يمتلئ بالبريـشيا عندما تتضاءل الثورة . ويسمى التركيـب الناشـئ عـن ذلك **بالدياتريم أو الثاقبة البركانية diatreme**. ولقـد أوضحت الأبحاث العديدة ميكانيكية تكوين الدياتريم، حيث أظهرت دراسة المعادن والـصخور التـى تحتويهـا بعض الدياتريمات أنها تتكون فقط فى الأعماق الكبيرة – نحو 100 كم أو أكثر – داخل الوشاح العلوى (شـكل 16.4). وتدل الدراسات أن الدياتريمات تكونـت مـن صـهر الـصخور التـى تقـع فى طريقهـا بالـصهارات الصاعدة الغنية بالغاز ، حيث تقذف فى النهاية وبطاقـة انفجارية أحيانا وبسرعة عالية جدا غـازات وكـسرات من المخرج ، وكسرات من أعـماق القـشرة والوشـاح . وربما تشبه هذه الثـورات خـروج العـادم النفـاث مـن صاروخ مقلوب هائل فى الأرض حيـث يقـوم بتفجـير الصخور والغازات فى الجو .

وهنــاك ديــاتريم فى منــاجم كمــبرلى الأســطورية بجنوب إفريقيا ، وهى واحدة من أكبر مناجم المـاس فى



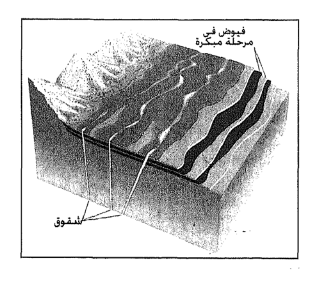
شكل (16.5): جبل النهود – جنـوب الـصحراء الـشرقية – مـصر ، والـذى يعتقـد أنـه نـصلة بركانيـة volcanic neck أو سـدادة بركانيـة volcanic plug من صخور التراكيب البركانية تكونت من صهارة بردت داخل عنـق البركـان المركـزى وبقيـت بعـد عمليـات تجويـة وتعريـة البركان . (أ.د. محمود فوزى الرملى – المساحة الجيولوجية – مصر)

العالم . ويتكون هذا الدياتريم من صخر البريدوتيت ، وهو صخر فوقهاق مكوّن فى معظمه من معدن الأوليفين بالإضافة إلى معدن البيروكسين . كما يحتوى أيضاً على الماس الذى يتكون من عنصر الكربون تحت ضغط كبير فى الوشاح مع كسرات مختلطة من صخر الوشاح التقطتها الصهارة أثناء صعودها إلى سطح الأرض . وينظر إلى هذا الدياتريم كما لو أن بئرا قد حفر فى الوشاح يصل إلى عمق 300 كم . وتمدنا الكسرات التى التقطتها الصهارة أثناء صعودها بالدليل المباشر الوحيد عن مواد الوشاح العلوى upper mantle ، والتى تتكون أساسا من صخر البريدوتيت.

النصلات البركانية : النصلات البركانية vdcanic necks هى أحد أشكال تواجد الصخور البركانية . ويعتقد أنها تتكون من صهارة بردت داخل عنق البركان المركزى وبقيت بعد عمليات تجوية وتعرية البركان (شكل 16.5) . وتعرف النصلة البركانية أيضًا بالسدادة البركانية volcanic plug .

ب. الانبثاقات الشقية

عندما تتدفق لابة بازلتية من خلال شق فى سطح الأرض يبلغ طوله عشرات الكيلومترات فإن اللابة المتدفقة تغطى مساحات شاسعة من سطح الأرض . وفى خلال الأربعة ملايين سنة الأخيرة حدث عدد لا يحصى من الانبثاقات الشقية **fissure eruptions** على سطح الأرض (شكل 17.5) . وتعتبر الانبثاقات التى تحدث على امتداد حيود وسط المحيط ضمن أهم الانبثاقات الشقية . وفى خلال التاريخ المسجل ، وفى عام 1783م، شاهدت البشرية ولمرة واحدة مثل تلك الانبثاقات فى أيسلندة ، والتى تعتبر جزءا مكشوفا من حيود وسط الأطلنطى. ولقد مات نحو خمس سكان أيسلندة نتيجة هذا الانبثاق ، حيث فاض نحو 12 كم^3 من البازلت من خلال شق بلغ طوله نحو 32 كم . وقد استمرت الانبثاقات الشقية فى أيسلندة على نطاق أقل من ذلك الذى حدث فى كارثة عام 1783م.



شكل (17.5): تنساب اللابة البازلتية منخفضة اللزوجة بسرعة أثناء الانبثاقات الشقية fissure eruption بعيدا عن الشقوق لتكون طبقات من اللابة ، تغطى مساحات شاسعة من الأرض مثل الحرات فى الجزيرة العربية ، بدلا من تكوين مخروط بركانى .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

1. بازلت فيضى (الهضاب البازلتية)

يحتوى السجل الجيولوجى على أدلة عديدة عن فيوض بازلتية انبثقت من شقوق كبيرة. فعندما ينبثق بازلت فيضى **flood basalts** (ويعرف أيضا بالهضاب البازلتية **basaltic plateaus**) من شقوق طولية ينشأ سهل أو تراكم على هيئة هضبة من اللابات ، بدلاً من التراكم على هيئة جبل بركانى كما يحدث عند الانبثاق من مخرج مركزى . فلقد غطت

فيـوض البازلـت التـى كونـت هـضبة كولومبيا نحـو 200.000 كـم^2 مـن سـطح الأرض ، حيـث وصـل سمك بعض الفيوض المنفصلة أكثر من 100 متر ، بينما كانـت بعـض الفيـوض الأخـرى سـائلة لدرجـة أنهـا انتشرت لمسافة أكبر من 60 كم من مـصدر الـصهارة . ولقد تكوّن عـلى سـطح اللابـة تـضاريس جديـدة مـع وديـان للأنهـار جديـدة غطـت الأسـطح القديمـة. وتتواجد الهضاب المكونة من الفيوض البازلتية على كل قارة (شكل 2.5).

2. رواسب فيض الرماد

تكوّن المـواد الفتاتيـة الناريـة المنبثقـة مـن الـشقوق الطولية أيضا فرشًا شاسـعة مـن طـف بركـانى صـلب تسمى رواسب فيض الرماد **ash- flow deposits** فى الشقوق الطولية . ولم يشاهد أى من البشر أحد هـذه الأحداث المهولة حتى الآن . حيث يعتقد أن رواسـب فيض الرماد قد تكونت فى العصر الثالث المبكر Early Tertiary فى جريـت بيـزن Great Basin فى نيفـادا والولايـات المجـاورة بهـذه الطريقـة ، والتـى غطـت مساحة تصل إلى نحو 200000 كم^2 ، ويصل سـمكها إلى أكثر من 2500 متر فى بعض المناطق .

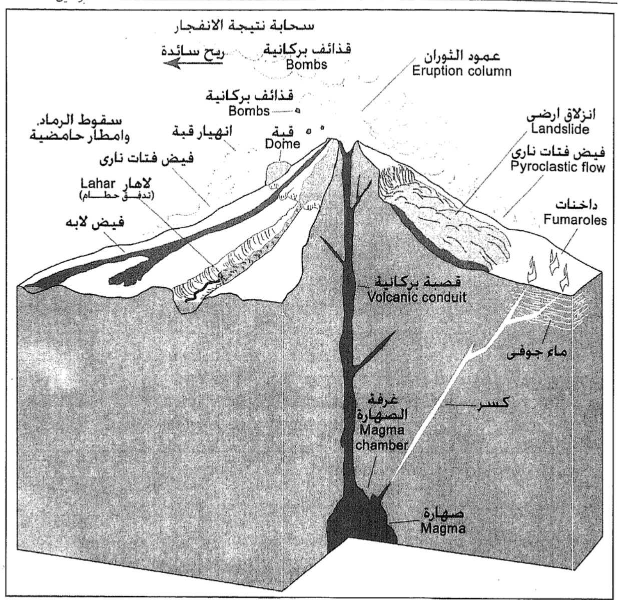
ج. بعض الظواهر البركانية الأخرى

1. اللاهار

يعرف التـدفق الطينـى لرواسـب الرمـاد البركـانى والمـواد البركانيـة الأخـرى المـستقرة فـوق منحـدرات المخاريط البركانية المشبعة بالماء **باللاهار lahar** (معربة عن الإندونيسية)، وهو يعتبر من أهم العوامل البركانية الخطرة شديدة التخريب (شكل 18.5) . وقـد يحـدث اللاهار عندما يقابل فيض الفتات النارى نهرا أو جليدا لحافه مثلجة ، أو عندما يتكسر حـائط فى بحـيرة فوهـة البركان فجـأة لينطلـق المـاء ، أو عنـدما ينـصهر جليـد المثالج نتيجة تدفق لابة ، أو عندما يحـول المطـر المنهمـر بغزارة رواسب جديدة من الرماد إلى تدفق طينى. ومن المعـروف أن اللاهـار تحمـل كتـل ضـخمه لعـشرات الكيلومترات. وعندما حدثت ثورة بركان نيفـادو دول روز فى جبال الأنديز بكولومبيا عـام 1985م ، تـسببت رواسب اللاهار المتكونة نتيجـة انـصهار جليـد المثـالج قرب القمة فى تغطية المنحدرات ودفـن مدينـة أرمـيرو على بعد 50 كم ، وقتـل أكثـر مـن 25000 شـخص . وعنـــدما حـــدثت ثـــورة بركـــان بينـــاتوبو Mount Pinatubo فى الفلبــين فى يونيــو 1991م ، تـسببت رواسب اللاهار فى حدوث كارثـة ، كلـما حـل موسـم المطر لمدة خمسة أعوام أو أكثـر بعـد حـدوث الثـورات البركانية (شكل 19.5).

2. الداخنات والينابيع الحارة والفوارات (الجيزارات)

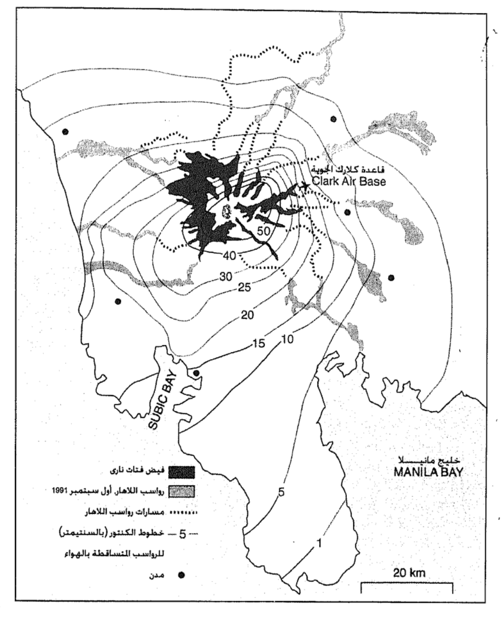
لا يتوقف النشاط البركانى بتوقف انسياب اللابة أو المواد الفتاتيـة الناريـة ، ولكـن قـد تـستمر البراكـين فى النشاط لعقود أو حتـى لقـرون . وتـستمر البراكـين فى قذف أدخنـة الغـازات والأبخـرة عـبر مخـارج صـغيرة تـسمى داخنـات **fumaroles** بعـد انتهـاء الثـوران الرئيسى . وتحتوى كل هذه الانبثاقات على مـواد ذائبـة تترسب على الأسطح المحيطة ، كما يتبخر الماء أو يـبرد. وتتكون نتيجة ذلك أنواع عديدة من رواسب سـطحية (مثل الترافرتين travertine) تغطى سـطح الـصخر ، وقد تحتوى على بعض المعادن النفيسة .



شكل (18.5): رسم تخطيطى يوضح بعض المعالم البركانية مثل فيض الفتات النارى والداخنات ، بالإضافة إلى بعض أخطار البراكين مثل اللاهار والانهيارات الأرضية (انهيار الحطام) ، حيث يمكن التوعية بتلك الأخطار؛ فالإقامة فى وادى بالقرب من بركان فى اتجاه الريح أكثر خطراً من الاقامة فى الاتجاه المعاكس للريح.

(After Myers, B. and Brantley, S.. U.S. Geological Survey in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وعندما تقابل المياه الجوفية المتحركة فى باطن الأرض صهارات مدفونة (تحتفظ بالحرارة لمئات الآلاف من السنين) فإنها تسخن وتعود إلى السطح على هيئة ينابيع حارة **hot springs** . والفوارة (الجَيزَر) **geyser** هى نوع من الينابيع الحارة ينبثق منها الماء الساخن والبخار بقوة وبصورة متقطعة ، وكثيرا ما يكون مصحوبا بأصوات رعدية . ويستمد اسمها من كلمة geyser المستخدمة فى أيسلندة وتعنى يتدفق أو ينفجر . ويعتبر جيزر أولد فيثفل Old Faithful فى يللستون بارك ، من أحسن أمثلة الفوارات فى الولايات المتحدة الأمريكية ، حيث تندفع نافورة من الماء الساخن بارتفاع يصل إلى نحو 60 مترا كل 65 دقيقة تقريبا .

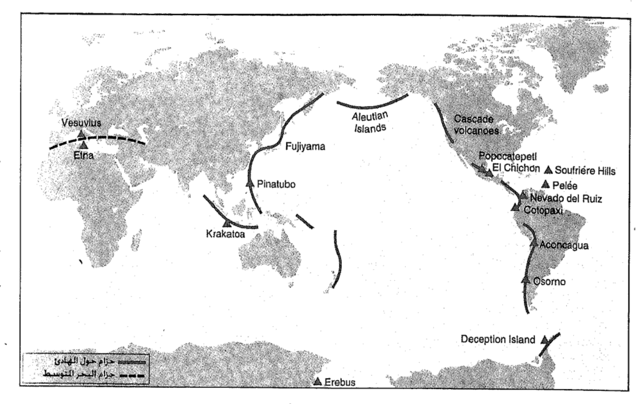


شكل (**19.5**): خريطة توضح الرواسب الرئيسية الناتجة عن الانفجار الضخم لجبل بينا توبو **Mount Pinatubo** فى الفلبين ، حيث اندفعت رواسب الرماد البركانى تحت تأثير الرياح فى يونيو **1991** م . وقد تسببت رواسب اللاهار فى حدوث كوارث بالمنطقة كل موسم مطر على امتداد خمس سنوات أو أكثر بعد حدوث الثورة البركانية .

(After the Pinatubo Volcano Observatory Team, EOS, December 3, 1991, in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

IV. التبركن وتكتونية الألواح

لاحظ الناس منذ أمد بعيد ، أن كل البراكين الكبيرة فى العالم تقع على امتداد حزامين رئيسيين (شكل 20.5)، وهما "الحزام حول الهادئ circum-Pacific belt أو حزام النار Ring of Fire" ، والثانى هو حزام البحر المتوسط Mediterranean belt . أما الحزام حول الهادئ فهو الحزام الأكبر ، ويضم عديدًا من البراكين فى وسط أمريكا الشمالية وغرب أمريكا الجنوبية والقارة القطبية الجنوبية (أنتاركاتيكا) . ويشمل الجزء الغربى من حزام المحيط الهادئ براكين نيوزيلندا وأندونيسيا والفلبين واليابان ، بينما يشمل الجزء الشمالى



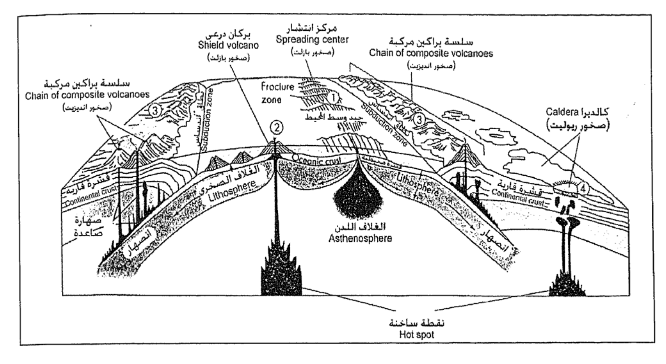
شكل (20.5): خريطة للعالم توضح الأحزمة البركانية الرئيسية.

من هذا الحزام البراكين النشطة فى روسيا وجزر اليوشان . أما الحزام الثانى فهو حزام البحر المتوسط ويشمل جبل فيزوف وجبل ثيرا (جزيرة فى البحر المتوسط) وجبل أتنا فوق جزيرة صقلية .

ويظهر توزيع البراكين النشطة فى العالم ، والتى يتراوح عددها بين 500 و 600 بركان أنها ليست موزعة عشوائيا ، بل تتوزع تبعا لنمط محدد . فيتواجد نحو 80 ٪ من البراكين النشطة عند حدود الألواح المتقاربة . و15٪ عند حدود الألواح المتباعدة ، والبقية القليلة داخل الألواح . وكما أوضحنا فى الفصل السابق، فإن تركيب اللابة يختلف حسب موقع البركان من تكتونية الألواح (شكل 21.5) . وسنناقش فيما يلى شرحا لتفسير توزيع ونشأة البراكين فى إطار تكتونية الألواح :

أ - التبركن عند حدود الألواح المتباعدة (تبركن نطاق الانتشار)

كما أوضحنا سابقا فى الفصلين الأول والرابع ، أن قيعان المحيطات تتميز بوجود كسور تكوّن نظام خسف فى الكرة الأرضية ، تنفصل على امتدادها الألواح وينبثق من خلالها البازلت . ويمتد الكسر بين اللوحين المتباعدين إلى الأعماق فى الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) . وتصعد الصهارات البازلتية والمتكونة نتيجه الانصهار الجزئى للصخر فوقالمافى الساخن فى غلاف الانصهار ، فى الفجوة بين الألواح المنفصلة ، وتتدفق أعلى الكسر لتكوّن حيود المحيط وبراكين وقشرة قاع المحيط البازلتية (شكل 21.5) . وقد صبت كميات هائلة من الصهارة عبر هذا النظام من كسور القشرة الأرضية ، حيث تدفقت صهارة تكفى لتغطية قشرة كل المحيطات الحالية خلال المائتى مليون سنة الماضية.



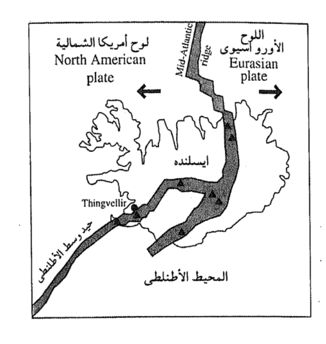
شكل (**21.5**): رسم تخطيطى يوضح العلاقة بين عمليات تكتونية الألواح والنشاط البركانى ، حيث:

1. تنشأ الصخور البازلتية من الأسثينوسفير عند حيود وسط المحيط .
2. تتكون براكين درعية بازلتية بعيدا عن حدود الألواح فوق النقاط الساخنة الموجودة أسفل ألواح الغلاف الصخرى .
3. تصاحب البراكين المركبة صخور بركانية أنديزيتية ونطاقات اندساس ونادراً صخور ريوليت.
4. تحدث انبثاقات تؤدى إلى تكون كالديرات ، قد يصاحبها صخور ريوليتية تتكون عندما تختلط الصهارة الصاعدة مع القشرة القارية .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتنخفض حرارة البراكين كثيرا عند قيعان المحيطات حينما تتحرك المياه الباردة فى كسور حيود وسط المحيط . ويكون ماء البحر الذى ارتفعت درجة حرارته وأصبح غنيا بالمعادن الذائبة نتيجة تلامسه مع الصهارة ينابيع ساخنة جداً (350°م) ومخارج للدخان بامتداد هذه الكسور . وتعتبر هذه الأماكن مصدراً مهما للمعادن بما فيها خامات الزنك والنحاس والحديد (شكل 12.19).

وتمدنا أيسلندة ، والتى تعتبر واحدة من المناطق القليلة المكشوفة لحيود وسط الأطلنطى، بنموذج لمشاهدة عملية انبثاق الصهارة عبر كسور قيعان المحيطات مباشرة . وتتكون جزيرة أيسلندة فى معظمها من البازلت ، كما تتميز بأنها فى حالة شد عند طرفيها ، حيث يشد نصفها الشرقى ناحية اللوح الأوروآسيوى ، بينما يشد نصفها الغربى ناحية لوح أمريكا الشمالية (شكل 22.5) . وتتسبب قوى الشد فى تكوين كسور تتدفق عبرها الصهارة إلى السطح. ويتكون فى نهاية كل مرحلة نتيجة لتصلب اللابة قاطع dike رأسى وطبقات أفقية تقريبا على الأسطح الجانبية للكسور. ومع كل مرحلة جديدة من الانتشار الجانبى، يتكون كسر جديد ويحدث تدفق جديد خلال القاطع القديم. وهكذا تنمو أيسلندة نتيجة الانبثاقات المتكررة من الكسور الطولية، وأيضا من مخارج محلية. وعلى الرغم من اختلاف هذا السيناريو عما يدور تحت الماء، فإن أقوى الاحتمالات تشير إلى أن قشرة قيعان المحيطات تتكون بالطريقة نفسها .



شكل (22.5): تقع جزيرة أيسلندا فوق نقطة ساخنة تقع على حيد وسط المحيط الأطلنطى، حيث يشد نصف الجزيرة الشرقى ناحية اللوح الأوروآسيوى، بينما يشد نصفها الغربى ناحية لوح امريكا الشمالية.
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ب - التبركن عند الحدود المتقاربة (تبركن نطاق التقارب)

يتم فى الوقت الحالى دراسة وفحص العديد من الظواهر التى تحدث عندما تتقارب الألواح ويحدث الاندساس subduction. ومن المظاهر المميزة لذلك سلسلة البراكين التى توازى الحدود المتقاربة، أيا كان نوع تلك الحدود، سواء كان محيطيا- محيطيا، أو محيطيا-قاريا (شكل 21.5). وتختلف أنواع الصهارات التى تغذى البراكين فى نطاق التقارب عن الصهارة البازلتية المتكونة فى حيود وسط المحيط. وتتراوح تلك الصهارة فى تركيبها من مافية إلى متوسطة إلى فلسية؛ أى من بازلتية إلى أنديزيتية إلى ريوليتية. وتقدم فكرة الاندساس عدة تفسيرات للميكانيكية التى تؤدى إلى تكوّن أنواع مختلفة من الصهارات فى نطاق الاندساس.

وقد يتسبب الماء الموجود فى رواسب الطبقة الخارجية لقيعان المحيطات فوق اللوح المندس فى انصهار الوشاح الساخن فوقه، حيث يعمل هذا الماء على خفض درجة حرارة انصهار الصخر (الفصل الرابع). وتتكون فى هذه العملية صهارات بازلتية تغذى براكين نطاق التقارب. وتتكون بالإضافة إلى الصهارات البازلتية التى تنشأ من الانصهار الجزئى للوشاح صهارات متوسطة وأخرى أكثر فلسية، إذا توافرت مصادر لتزويد الصهير بالسيليكا والعناصر الأخرى. وترتفع درجة حرارة اللوح المندس البارد فى نطاقات الاندساس نتيجة الغوص فى الوشاح الساخن، حيث تنشأ مواد نتيجة انصهار رواسب قاع المحيط والقشرة المحيطية أعلى اللوح المحيطى المندس. وبالإضافة لذلك، تتداخل الصهارات الصاعدة من الوشاح فى القشرة الفلسية للوح القارى العلوى وتسبب انصهاره جزئياً. وتنشأ عن هذه العملية أنواع من الصهارات الأكثر فلسية، والتى تغذى البراكين عند حافة اللوح القارى العلوى. وهكذا يمكن التنبؤ بالنشاط البركانى المصاحب لعملية الاندساس ونشأة صهارات مختلفة الأنواع، فى إطار نظرية تكتونية الألواح.

1- التبركن فى التقارب المحيطى – المحيطى

عندما يتقارب لوحان محيطيان، ينشأ من قاع محيط اللوح العلوى قوس من الجزر البركانية تعرف بأقواس الجزر island arcs، نتيجة انبثاق البازلت أو الأنديزيت أحيانا، أو الريوليت نادرا. وربما ينشأ البازلت من الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) أعلى اللوح الهابط (المندس). ويتواجد الأنديزيت (الأكثر سيليكية) عندما تضاف عناصر مستمدة من الانصهار الجزئى للقشرة البازلتية عند درجات انصهار مختلفة، بالإضافة إلى رواسب قاع المحيط المصاحبة للوح

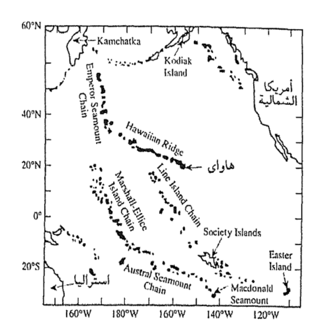
الهابط. وتمثل أقواس جزر الأليوشن وماريانا نموذجا أولياًprototype لهذه العملية.

2- التبركن فى التقارب المحيطى - القارى

عندما يندس لوح محيطى تحت لوح يحمل قارة فوق حافته المتقدمة ، فإنه تنشأ سلسلة جبال بركانية قوسية تعرف بالأقواس البركانية volcanic arcs فى نطاق التصادم بالقرب من الحافة القارية (شكل 21.5).وتمثل جبال الأنديز حدود التقارب بين لوحى أمريكا الجنوبية (حافة قارية) ونازكا (حافة محيطية).ويؤدى اندساس لوح جوان دى فوكا الصغير (حافة محيطية) تحت لوح أمريكا الشمالية (حافة قارية) إلى تكوّن براكين سلسلة الكاسكيد Cascade Range ، والتى تمتد من كاليفورنيا الشمالية إلى كولومبيا البريطانية ، حيث تتضمن هذه السلسلة بركان سانت هيلين. وعند حدوث ثورة بركانية ، تقذف كميات من الرماد واللابة الأنديزيتية ، وبعض اللابة الريوليتية . وغالبا ما يكون المصدر خليطا من صهارة بازلتية تصعد من الوشاح مختلطة بقشرة قارية فلسية أعيد صهرها أثناء صعود الصهارة البازلتية فى تلك القشرة . وبالإضافة إلى ما سبق ، يمكن أن تضاف مواد منصهرة من اللوح المندس إلى الخليط .

جـ - التبركن داخل الألواح

يمثل التبركن بعيدا عن حدود الألواح مشكلة لنظرية تكتونية الألواح ، حيث يبدو أنه استثناء من المقارنة الدقيقة بين التبركن وحدود الألواح . فلو أخذنا مثالا من جزر هاواى التى تقع وسط لوح المحيط الهادئ ، فإن سلسلة الجزر تبدأ من البراكين النشطة فى هاواى ، وتستمر مثل سلسلة من حيود وجبال بركانية خامدة مغمورة تم تعريتها ، وتزداد فى العمر كلما ابتعدنا عن جزر هاواى . وتتميز تلك السلسلة بأنه لا تصاحبها زلازل كبيرة متكررة ، ولذلك فإنها تسمى حيدًا لازلزاليًّا **aseismic ridge** . وقد كان من الصعب تفسير نشأة الحيود اللازلزالية ذات الأصل البركانى ، والتى تتواجد أيضاً فى كل مكان فى المحيط الهادئ وفى المحيطات الأخرى الكبيرة ، فى إطار نظرية تكتونية الألواح ، حتى تم التوصل إلى فكرة النقاط الساخنة **hot spots** . وقد عرض اقتراح النقاط الساخنة لشرح أشكال البراكين داخل القارات بعيدا عن حدود الألواح . ويعتبر بركان يلوستون بارك Yellowstone Park مثالا لنقطة ساخنة قارية نشطة فوق لوح أمريكا الشمالية . فطبقا لهذه الفرضية والموضحة فى (شكل 21.5) ، فإن النقاط الساخنة تمثل تعبيرا عن البلومات على سطح الأرض . والبلوم **plume** هو عبارة عن مادة صلبة ساخنة تصعد من الأعماق خلال الوشاح (وربما حتى الحد الذى يفصل بين اللب والوشاح) . وعندما يصل البلوم إلى الأعماق الضحلة ، حيث ينخفض الضغط فإنه يبدأ فى الانصهار. وتخترق الصهارة الغلاف الصخرى (الليثوسفير) لتنبثق عند السطح . ويعتقد أن هذه التيارات العمودية ثابتة فى الوشاح ، ولا تتحرك مع حركة ألواح الغلاف الصخرى . وعند مرور اللوح فوق البلوم ، فإن النقطة الساخنة تترك سلسلة من البراكين النشطة والتى تتحول إلى براكين خامدة تزداد فى العمر كلما ابتعدنا عن النقطة الساخنة . ويوضح توزيع البراكين الخامدة ، والتى تكوّن جزر هاواى وسلسلة جبال الإمبرور سيمونت Emperor seamount (شكل 23.5) آثار حركة لوح المحيط الهادئ فوق نقطة ساخنة يميزها البراكين النشطة فى هاواى ، بينما يسجل الانحناء فى السلسلة تغيرا فى اتجاه حركة اللوح .



شكل (23.5): خريطة توضح سلسلة البراكين الممتدة بنظام خطى، والتى نشأت عن حركة لوح المحيط الهادئ فوق نقطة ساخنة. ويعكس الانحناء فى سلسلة البراكين تغير اتجاه حركة اللوح.

على أن أصل الانبثاقات الشقية للبازلت فوق القارات مازالت محل نقاش حتى الآن. ومن تلك الانبثاقات تلك التى كونت هضبة نهر كولومبيا وهضاب اللابة الأكبر فى البرازيل وبارجواى والهند وسيبريا. وقد اقترح البعض وجود بلومات ضخمة تعرف بالسوبربلوم superplume، تصعد من الأعماق عبر الوشاح كمصدر للانبثاقات الشقية، التى تكوّن هضاب اللابة الكبيرة القارية، حيث يزيد حجم بعضها على مليون كيلومتر مكعب. ويقترح البعض الآخر أن كسورا (لم يحدد أصلها) اخترقت الغلاف الصخرى القارى، وأن اللابات البازلتية، والتى تمثل الانصهار الجزئى للوشاح أسفله قد اندفعت بسرعة إلى السطح بدون تشوب contamination (تغير التركيب الكيميائى للصهارة) من القشرة الفلسية. وقد كان التبركن الذى غطى معظم سيبريا باللابة منذ نحو 250 مليون سنة عند نهاية العصر البرمى ذا أهمية خاصة، حيث يعتقد أنه كان السبب فى أكبر هلاك للأحياء فى التاريخ الجيولوجى.

ويمكن ملاحظة وجود الانبثاقات الشقية التى تميز المراحل الأولى للخسف القارى وبداية تكوّن محيط جديد فى أماكن عديدة من العالم. فمثلاً قد يوجد البازلت فى وديان الخسف فى شرق إفريقيا. حيث يعتقد أنه يمثل أحد مظاهر انشطار هذا الجزء من إفريقيا والذى لم يكتمل بعد.

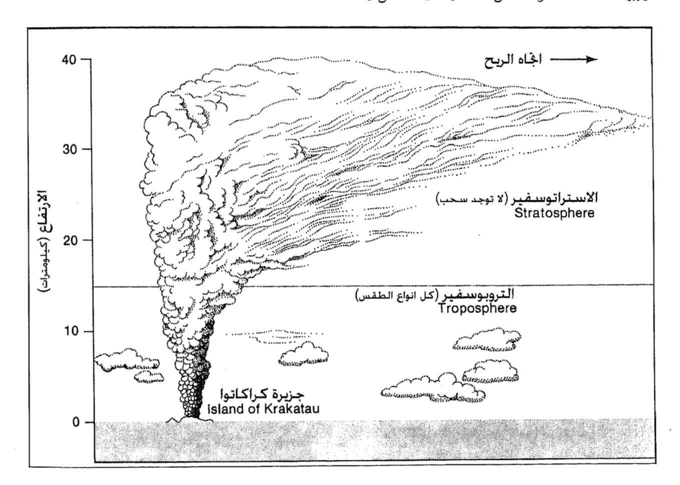
V. البراكين والمناخ

تلقى العلاقة بين الثورات البركانية والتغيرات فى الطقس weather والمناخ climate المزيد من الاهتمام منذ فترة طويلة. فعندما ثار بركان لاكى Laki volcano فى أيسلندة عام 1783 م انبثقت منه أكبر لابة فى التاريخ، وخرجت كمية ضخمة من الغازات التى غطت جزيرة أيسلندة ومعظم شمال أوروبا لعدة شهور فى صورة غيام haze وضباب أزرق. وقد احتوت الغازات على كمية من غاز الفلورين مما أدى إلى موت كثير من الدواب فى أيسلندة، وحدوث مجاعة قاسية أدت إلى هلاك نحو خمس سكان الجزيرة. ومع مرور الوقت وصل الغيام الرقيق إلى أوروبا، حيث أمكن رؤيته لأيام عديدة فى الصيف. وقد كان شتاء 1783–1784 م قاسيا خاصة فى أوروبا. وقد أوضحت المشاهدات الحقلية أن الرماد الدقيق والغازات التى انبثقت من بركان لاكى قد حجبت أشعة الشمس بدرجة أدت إلى وجود طقس بارد. وقد كان البريطانى لامب Lamb إخصائى علم المناخ هو صاحب اقتراح أن النشاط البركانى يؤثر على المناخ. وقام لامب بجمع قائمة تفصيلية بالثورانات البركانية منذ عام 1500 قبل الميلاد، وعمل حسابا لمعامل يعتمد على الكمية الظاهرة من الحطام البركانى المنتشر فى الغلاف الجوى. وقد توصل إلى أن هناك علاقة واضحة بين التغيرات المناخية فى العالم والثورات البركانية الكبيرة.

وإذا كان الرماد والغازات تؤثر على الطقس والمناخ، فلابـــد أن التـــأثير يكـــون فى الاستراتوســـفير stratosphere (الجزء العلـوى مـن الغـلاف الجـوى ويقع بين 10 و 50 كم فوق سطح الأرض) حيث تحوم طبقة من الغازات لفترة طويلة ، مع عدم وجود سحب أو أمطار تغسل تلك الملوثات بسرعة (شـكل 24.5) . وقد قام إخصائيو علم المناخ بتحديد طبقة مـن الـرذاذ تبقى لمدة طـويلة عنـد ارتفاعـات تـتراوح بـين 15 و 30 كم ، والتى يبدو أنها تتكون من غيام رقيـق يتكـون مـن رمـاد سـيليكاتى وملـح مـن البحـر ونقيطـات droplets من حمض الكبريتيك تقلل من شفافية الجو ، وربما تنشأ تلك المكونات من مصادر عديدة ، مثل رذاذ البحـر أو الأعاصـير الترابيـة أو الثـورات البركانيـة أو حرائق الغابات أو الملوثـات الـصناعية . وتتغـير كثافـة طبقة الرذاذ خلال شهور أو سنوات ، إلا أنها قد تتغـير فجأة نتيجة ثورة بركانية، كما تحتاج لسنوات حتى تعود إلى وضعها الطبيعى. وتسقط أشعة الـشمس عـلى هـذه الطبقـة مـن الغيـام فى الاستراتوسـفير ، ممـا يـؤدى إلى ارتفاع درجة حـرارة الاستراتوسـفير وبـرودة الغـلاف الجوى أسفله ، وكذلك سطح الأرض .

VI. تقليل مخاطر كوارث البراكين

يهدد واحد من كل ستة براكين نشطة فى العالم حيـاة البشر . ويتراوح عدد تلـك البراكـين بـين 500 و 600



شكل (**24.5**): السحابة التى اندفعت عاليا فى طبقة الاستراتوسفير من بركان كراكاتو Krakatau volcano عام **1883**م ، حيث لاتوجد سحب ممطرة يمكنها أن تعيد الحطام البركانى إلى سطح الأرض ، ويبقى الرماد البركانى معلقا فى طبقة الاستراتوسفير لعدة شهور أو سنوات .
(After Hazlett, R., 1978 in Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

بركان . كما أنها تـدمر الممتلكـات عنـدما تنهـار المبـانى الضخمة وتحدث الانفجارات العنيفة ويتساقط الرمـاد وتنطلـق الغـازات المهلكـة والملوثـة للغـلاف الجـوى وتنـساب اللابـة واللاهـار . ويوضـح شـكل (18.5) بعض الكوارث التى تحدثها البراكين .

وقد تمكن العلماء الذين يراقبون جبل سانت هيلـين وجبـل بينـاتوبو Pinatubo مـن التنبـؤ والتحـذير وإصدار تعليمات الإخلاء من ثـورات رئيـسية هائلـة . وفى حالة بركان بيناتوبو، والذى لم يثر لمـدة 500 عـام ، فقد صدر التحذير قبل الثورة العنيفة بعـدة أيـام. ومـن ثم تم إخلاء نحو ستين ألف شخص مـن منطقـة يبلـغ قطرها 10 كم من قمة البركان . وقد تم إنقاذ عـشرات الآلاف من الأحياء من اللاهار الذى دمر كل شـىء فى طريقه . وبذلك أمكن تجنب الكارثة ونجـا الكثـير مـن البشر عدا القليل منهم الذين تجاهلوا التحذيرات .

وعـلى عكـس قـصص هـذه النجاحـات ، فهنـاك إخفاقات منها مأساة بركان نيفادو ديل روز Nevado del Ruiz volcano فى كولومبيا عام 1985م . فرغم تحذير العلماء من خطورة هـذا البركـان ، حيـث توجـد قمة جليدية على قمة الجبـل العاليـة ، وأن أى انـسياب للابة أو لكسرات صخرية ساخنة فوق الجليد ستـسبب كارثة . وقد استعد العلماء بإصدار التحـذير ، إلا أنـه لم تكن هناك إجراءات جادة للإخـلاء . ونتيجـة لـذلك ، فلقد هلك خمسون ألفا مـن البـشر بـسبب اللاهـارات التى انطلقت نتيجة الثورة المحدودة .

وقد تطور علم البراكين إلى الدرجة التى يمكننا بهـا تحديد مواقع البراكين الخطيرة فى العالم وتحديد المخـاطر الممكنة ، من نوع المواد التـى تخـرج مـن البركـان أثنـاء الثورات فى مراحلها الأولى. ويمكن استخدام تقيـيمات المخاطر لإصدار التعليمات بخـصوص عمـل نطاقـات لتقييـد اسـتخدام الأرض – وهـو أكثـر مقيـاس مـؤثر لتقليل الكوارث . وتستطيع أجهزة الملاحظـة والرصـد أن تـسجل إشـارات الـزلازل أو تغـير درجـة حـرارة الأرض أو تحرك الصهارة ، مما يؤدى إلى انتفاخ البركان وانبثاق الغاز ، أو تغيرات الحرارة عنـد مخـارج البخـار والينابيع الحارة على البراكين ، والتى تحذر من ثورة على وشك الحدوث . كما يمكن إخلاء البشر الموجـودين فى نطاق الخطر تحت إشراف السلطات المختصة . وجـدير بالذكر ، أنه لايمكن منـع الثـورات البركانيـة ، إلا أنـه يمكن تقليل مخاطرها بدرجة معقولـة ، بتـضافر جهـود العلماء ووضع برامج تثقيفية للناس .

وكـما أسـلفنا ، فـإن الثـورات البركانيـة لا يمكـن التحكم فيها ، إلا أنه فى بعض الحالات الخاصة ، يمكن تقليل الأضرار الناجمة عنها عـلى نطـاق محـدود . وربـما كان من أنجح المحاولات للتحكم فى النشاط البركـانى ما حدث فى أيسلندة فى يناير 1973 م ، حيـث تـم رش اللابة المتقدمة فى البحر. وقام المواطنـون بتبريـد اللابـه وبالتالى تقليل انسيابها، كما منعوها من سد مدخل الميناء وحافظوا على بعض المنازل من الدمار.

وبالنـسبة للمـستقبل ، فـإن أفـضل سياسـة لحمايـة الأحياء من خطر البراكين ، هو إنـشاء أنظمـة للتحـذير والإخلاء أكثر تقدماً ، وحظر إنشاء مجتمعات عمرانيـة فى الأماكن الخطرة بـصورة أكثـر صرامـة . إلا أن هـذه التدابير الوقائية قد لا تفيد كثيرا ، عنـدما ينـشط فجـأة بركان ساكن أو خامد لفترة طويلة ، مثل بركان فيزوف وسانت هيلين.

VII. الاستفادة من البراكين

لقد رأينا بعضا من المناظر الطبيعيـة الجميلـة لجبـال البراكين وأيضا بعضا من آثارها التدميريـة . كـما تقـدم البراكين أيضا بعض الفوائد لرفاهيـة الإنـسانية . فكـما ذكرنـا فى الفـصل الأول فـإن نـشأة الغـلاف الجـوى

والمحيطات ربما ترجع إلى النشاط البركاني في الماضي البعيد عند نشأة الأرض. وتتميز التربة المتكونة من المواد البركانية بأنها عالية الخصوبة بسبب وجود بعض المعادن التي تحتويها. وتعتبر الصخور البركانية والغازات والبخار أيضا مصادر للمواد الصناعية والكيماويات ، مثل البيومس (الحجر الخفاف) وحمض البوريك والأمونيا والكبريت وثاني أكسيد الكربون وبعض الفلزات. كما أن تحرك ماء المحيطات ودورته في شقوق حيود وسط المحيط عامل مهم في تكوين بعض الخامات المعدنية.

وتستخدم الطاقة الحرارية للبراكين في أماكن عديدة في العالم ، كما يتزايد استخدامها بمرور الوقت. فمعظم المنازل في بعض مناطق أيسلندة يتم تدفئتها بمياه ساخنة مستمدة من الينابيع الحارة. كما يستغل البخار الساخن والناشئ من ماء ارتفعت درجة حرارته نتيجة ملامسته لصخور بركانية ساخنة تحت سطح الأرض كمصدر للطاقة لإنتاج الكهرباء في إيطاليا ونيوزيلندة والولايات المتحدة الأمريكية والمكسيك واليابان والاتحاد السوفيتي السابق.

الملخص

1. تحدث البراكين حينما تصعد صخور منصهرة إلى السطح ، حيث إنها أقل كثافة من الصخور المحيطة. كما أن المصهور يعصر ويدفع إلى أعلى تحت تأثير وزن الصخور التي تعلوه .
2. تصنف اللابات إلى فلسية (ريوليت) ، أو متوسطة (أنديزيت)، أو مافية (بازلت) بناءً على تناقص كميات السيليكا وزيادة كميات الماغنسيوم والحديد التي تحتويها. ويعتبر التركيب الكيميائي للابة ودرجة لزوجتها ، بالإضافة إلى ما تحتويه عن غاز ، عوامل مهمة في شكل الثورة التي تحدث .
3. عندما ينبثق البازلت عالي السيولة على القارات فإنه ينبثق من شقوق طولية وينساب في هيئة فرش رقيقة تكوّن هضبة من اللابة . ويتكون البركان الدرعي من الانبثاقات المتكررة للبازلت من مخرج بركان مركزي .
4. تكون الصهارة السيليكية (الريوليتية) أكثر لزوجة ، وعندما تكون محملة بالغاز فإنها تميل إلى التدفق بعنف ، ويتراكم الحطام الناري الناتج في مخروط من حمم فتاتية أو يغطي منطقة شاسعة برواسب فيض الرماد . ويتكون البركان الطباقي (المركب) من طبقات متبادلة من فيوض اللابة وراسب فتات ناري.
5. يؤدي الانبثاق السريع للصهارة من غرفة الصهارة المتواجدة على بعد بضع كيلومترات تحت السطح إلى انهيار سقف غرفة الصهارة وتكوّن منخفض كبير على السطح يطلق عليه كالديرا.
6. علاقة التبركن وتكتونية الألواح: تتكون القشرة المحيطية من صهارة بازلتية تصعد من الغلاف اللدن (الاسثينوسفير) من خلال كسور حيود وسط المحيط (أنظمة الخسف) حيث تتباعد الألواح. وتميل اللابات البازلتية (مافية) ، والأنديزيتية (متوسطة) والريوليتية (فلسية) إلى الانبثاق في نطاقات التقارب . ويتكون البازلت من الانصهار الجزئي للوشاح أعلى اللوح المندس ، حيث يساعد في ذلك الانصهار الماء الذي ينساب من رواسب قاع المحيط المندسة. وعند تقارب لوحين محيطين ، تتكون جزر بركانية بازلتية .أما الأنديزيت والريوليت فإنها تنتشر في الأحزمة البركانية عند حدود الألواح المتقاربة بين لوحين أحدهما محيطي والآخر قاري . وتعمل إضافة السيليكا وعناصر

أخرى مستمدة من إعادة صهر القشرة القارية الفلسية أو من صهر رواسب قيعان المحيطات والقشرة أعلى اللوح الهابط ، إلى الصهارة البازلتية ، إلى تكوين الأنديزيت والريوليت . ويحدث التبركن داخل الألواح فوق النقاط الساخنة والتى تمثل تعبيرا على سطح الأرض للبلومات ، وهى مواد ساخنة تصعد من الأعماق فى الوشاح.

7. ربما ترجع نشأة الغلاف الجوى والمحيطات إلى التبركن أثناء تطور الأرض. والطاقة الحرارية فى مناطق التبركن الحديثة لها أهمية كبيرة كمصدر للطاقة. وبالإضافة إلى ما سبق، فإن الخامات تتكون عندما تتحرك المياه الجوفية وتدور حول الصهارات المدفونة أو يدور ماء البحر خلال أخاديد قاع المحيط.

8. هناك علاقة واضحة بين التغيرات المناخية فى العالم والثورات البركانية الكبيرة ، حيث يساهم الرماد والغازات المنطلقة من البراكين فى تكوّن طبقة غيام فى الأستراتوسفير . وعندما تسقط أشعة الشمس على هذه الطبقة ، ترتفع درجة حرارة الاستراتوسفير ويبرد الغلاف الجوى أسفله وكذلك سطح الأرض .

9. يمكن تقليل الأضرار الناجمة عن الثورات البركانية على نطاق محدود ، بإنشاء أنظمة تحذير وإخلاء متقدمة وحظر إنشاء مجتمعات عمرانية فى الأماكن الخطرة القريبة من البراكين النشطة .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://volcano.und.edu/
http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/
http://www.soest.hawaii.edu/GG/hcv.html
http://www.soest.hawaii.edu/GG/hcv.html
http://vulcan.fis.uniroma3.it/
http://www.dartmouth.edu/~volcano/

المصطلحات المهمة

a a	آه آه	lava	اللابة
agglomerates	أجلومرات	pahoehoe	باهوى هوى
aseismic ridge	حيد لازلزالى	phreatic explosion	انفجار الماء البركانى (انفجار فرياتى)
ash fall	رماد متساقط	pillow lava	لابة وسائدية
ash-flow deposits	رواسب فيض الرماد	plume	بلوم
ash	رماد	porphyritic texture	نسيج بورفيرى
basaltic plateaus	هضاب بازلتية	pyroclastic flow	فيض الفتات النارى
block	كتلة	pyroclastic rocks	صخور نارية فتاتية
bomb	قذيفة بركانية	pyroclasts	فتات نارى
caldera	كالديرا	shield volcano	بركان درعى
central eruption	انبثاق مركزى	spring	ينبوع
central vent	عنق (مخرج) مركزى	stratovolcano	بركان طباقى
cinder cone	مخروط حمم فتاتية	tephra	تفرا
composite volcano	بركان مركب	tuff	طف
crater	فوهة (بركان)	vesicle	فجوة (ج .فجوات)
diatreme	دياتريم (ثاقبة بركانية)	volcanic breccia	بريشيا بركانية
fissure eruption	انبثاق شقى	volcanic conduit	قصبة بركانية
flood basalt	بازلت فيضى	volcanic dome	قبة بركانية
fumarole	داخنة	volcanic ejecta	مقذوفات بركانية
geyser	فوارة (جيزر)	volcanic neck	نصلة بركانية
hot spot	نقطة ساخنة	volcanic tuff	طف بركانى
hot springs	ينابيع حارة	volcanism	تبركن
ignimbrite	إجنمبريت	volcano	بركان
lahar	لاهار (انهيار طين بركانى)	welded tuff	طف ملحوم
lapilli	لوبيات (حصى بركانى)		

الأسئلة

1. اشرح لماذا يعتبر الغلاف اللدن (الاسثينوسفر) مصدرا رئيسيا للصهارة؟ وماالذى يدفع الصهارة لتصعد إلى سطح الأرض ؟
2. ما الفرق بين الصهارة واللابة؟ اذكر أمثلة لأنواع الصخور البركانية ومقابلاتها من الصخور المتداخلة خشنة التحبب.
3. اذكر الأنواع الرئيسية للانبثاقات البركانية والرواسب ، والمعالم التى يكوّنها كل نوع .
4. ما العلاقة بين حدود الألواح والتبركن ؟ هل يمكن مقارنة نوع الانبثاق وتركيب الصخور البركانية مع حدود الألواح؟
5. ما ظروف تكون اللاهار والينابيع الحارة ورواسب فيض الرماد؟
6. اذكر أهم الظواهر الخطرة للبراكين.
7. ماذا تدلنا البراكين عن باطن الأرض؟
8. ما خصائص الصخور الفتاتية النارية؟ كيف نفرق بين ريوليت انساب على هيئة لابة وآخر انساب على هيئة طف ريوليتى؟
9. هل تحتوى صخور البورفيرى دائما على بلورات ظاهرة. ما المعادن التى قد نجدها على هيئة بلورات ظاهرة فى صخر البورفيرى الريوليتى وصخر البورفيرى البازلتى؟
10. كيف يتكون صخر البيومس ؟ وما المادة التى يتكون منها؟ لماذا يطفو البيومس فوق الماء؟
11. كيف يختلف طف اللويبات عن الطف الملحوم؟ وهل يمكن أن يتكون أى من الصخرين نتيجة الثورة من البركان نفسه ؟
12. لماذا يكون انحدار سطح البركان الدرعى لطيفاً ، بينما يتميز البركان الطباقى بجوانب حادة الانحدار ؟
13. اذكر النوع المميز من انسيابات اللابة البازلتية المتكونة نتيجة الانبثاقات تحت سطح الماء ، وكيف تتكون تلك الانسيابات .

الفصل 6

التجوية والتعرية

I. التجوية والتعرية ودورة الصخور

II. العوامل التى تؤثر فى التجوية :

أ. خصائص الصخر الأصلى

ب. المناخ : هطول المطر ودرجات الحرارة

ج. وجود أو عدم وجود التربة

د. الزمن: فترة التعرض

III. التجوية الكيميائية :

أ. عمليات التجوية الكيميائية.

ب. تأثير التجوية الكيميائية على الصخور الشائعة :

1. تركيز المعادن المستقرة
2. لحاء التجوية
3. التقشر والتجوية الكروية
4. أشكال السطح نتيجة التفاعل مع صخور الكربونات

ج. الاستقرار الكيميائى : التحكم فى سرعة التجوية :

1. الاستقرار الكيميائى
2. سلسلة استقرار المعادن الشائعة المكوّنة للصخور

IV. التجوية الطبيعية :

أ. التجوية الطبيعية فى المناطق الجافة

ب. التجوية الطبيعية فى بقية المناطق

ج. العوامل التى تحدد طريقة تكسر الصخور :

1. نطاقات الضعف الطبيعية

2. نشاط الكائنات الحية

3. التوتد الصقيعى

4. تبلور المعدن

5. تعاقب الحرارة والبرودة (التمدد الحرارى)

6. القوى الأخرى

د. التجوية الطبيعية والتعرية

V. التربة: راسب متبقٍ من التجوية :

أ. قطاع التربة

ب. المناخ والزمان وأنواع التربة :

1. المناخ الرطب : اللاتيريت

2. المناخ الجاف : البيدوكال

3. المناخ المعتدل : البيدالفير

ج. التربة القديمة : كدليل على المناخ فى الأزمنة القديمة

VI. الرواسب المعدنية المتكونة بالتجوية :

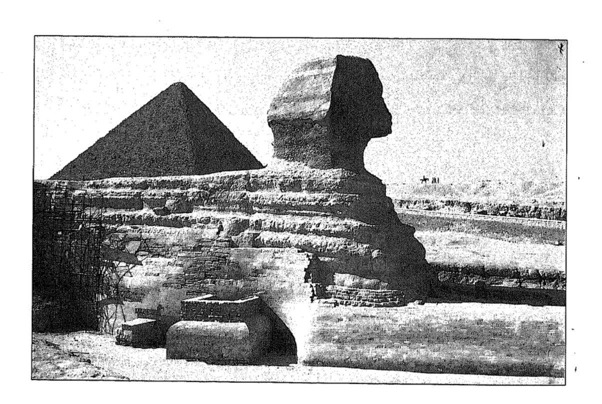
أ. الإثراء الثانوى

ب. تركيز الماس

VII. الإنسان كعامل من عوامل التجوية

تضعف كل المواد الصلبة وتتفتت ، حتى أكثر الصخور صلابة ، عندما تتعرض لتأثير الماء وغازات الغلاف الجوى ، إلا أن هذه العملية قد تستغرق آلاف السنين . وقد سعى الناس جاهدين منذ القدم للبحث عن أنواع معينة من الصخور لإنشاء المبانى التذكارية وشواهد القبور وغيرها ، لاعتقادهم أن الحجر جذاب ويتحمل عوامل الزمن وتأثيراته المختلفة . كما اكتشف اليونانيون والرومان منذ أكثر من ألفى عام أن الحجر الجيرى والرخام يصلحان كمواد نموذجية للبناء ، لتميزها بالكثافة العالية وسهولة تشكيلها بالنحت إلى أشكال فنية جميلة ، إلا أنهم لم يتوصلوا إلى معرفة السبب فى قابلية هذه الصخور الكربوناتية للتحلل .

وفى المدن الصناعية الكبرى ، فإن نقوش كل المبانى المشيدة من الحجر الجيرى أو الرخام سواء منها القديمة أو الحديثة تختفى ببطء تحت تأثير الملوثات الناتجة من حرق الوقود. ويعتبر ثانى أكسيد الكبريت والأمطار المحملة بالأحماض من أكثر المواد تأثيرا ، حيث تسبب ذوبان الكالسيت المكوّن لهذه الصخور . ونتيجة لذلك، فإن كثيرًا من المبانى التاريخية فى أوروبا ، والتى يرجع تاريخ بعضها إلى القرون الوسطى ، قد شوهت بدرجة



شكل (**1.6**): تمثال "أبو الهول" بالجيزة ، والذى نحت قبل **2900** سنة قبل الميلاد فى طبقات الحجر الجيرى النيميوليتى **nummulitic limestone** المحتوى على أصداف النيميوليت ***Nummulites*** التى تشبه العملات المعدنية. وقد أثرت عمليات التجوية فى تمثال "أبو الهول" فأدت إلى سقوط أجزاء من كتفه ، كما أثرت على جسده عموما خاصة عند منطقة العنق. وتجرى حاليا محاولات جادة لترميم هذا الأثر الفرعونى المهم .

كبيرة مثلها مثل بعض آثار وتماثيل قدماء المصريين (شكل 1.6) .

وسنتناول فى هذا الفصل بالتفصيل عمليتى التجوبة والتعرية . فالتجوية **weathering** هى عملية يتم فيها تفتيت الصخور فوق سطح الأرض . وتتكون نتيجة لهذه العملية كل المواد الطينية (الصلصال) وكل أنواع التربة والمواد الذائبة التى تحمل بواسطة الأنهار إلى المحيطات. وتؤثر التجوية بطريقتين:

- **التجوية الكيميائية chemical weathering**

وهى تحدث عندما يتغير التركيب الكيميائى للمعادن الموجودة فى الصخر أو حتى تذوب تماما . ويرجع السبب الرئيسى فى عدم وضوح أو اختفاء الحروف والنقوش من على شواهد القبور والمبانى التذكارية التاريخية إلى التجوية الكيميائية.

- **التجوية الطبيعية physical weathering**

وتعرف أيضا بالتجوية الميكانيكية mechanical weathering ، وهى تحدث عندما يتفتت الصخر الصلب إلى حبيبات صغيرة نتيجة للعمليات الطبيعية ، ولكنها لا تؤدى إلى تغيير فى التركيب الكيميائى للصخور . وقد عملت التجوية الطبيعية على تحويل المعابد اليونانية القديمة إلى كتل صخرية وأعمدة مفتتة، كما أحدثت الكثير من الكسور والشروخ فى المعابد المصرية . وتدعم التجوية الطبيعية التجوية الكيميائية ، حيث يعمل مزيد من التحلل الكيميائى على سرعة تكسر وتفتت الصخر . كما أنه كلما زادت مساحة السطح المعرض للتجوية الكيميائية ، زاد معدل التفكك والتكسر .

وتعتبر التربة واحدة من النواتج العديدة للتجوية ؛ حيث تؤدى العمليات التى تسبب تجوية الصخور إلى تكسرها إلى فتات صخرى يتفاوت فى الشكل ، كما يتراوح حجمه بين جلاميد ضخمة يصل قطرها إلى خمسة أمتار وحبيبات دقيقة لا ترى بالعين المجردة ، بالإضافة إلى الأيونات الذائبة فى مياه الأمطار والتربة .

وعموما ، فإن مجموع الذرات والأيونات التى تنتج عن التجوية الطبيعية والكيميائية تساوى مجموع ذرات وأيونات الصخر الأصلى الذى تمت تجويته . وتُحمَل هذه المواد المجواة بعيدا عن مكان التجوية بالرياح والمياه والجليد . وتترسب فى النهاية كرواسب مختلفة الأنواع ، مثل الرمل والغرين والصلصال الموجودة فى وديان الأنهار. ومع مزيد من التقدم فى دورة الصخور تدفن هذه الرواسب تحت رواسب إضافية ، وتتحول تدريجيا إلى صخور رسوبية ، وهو ما ستتم مناقشته فى فصل الصخور الرسوبية.

I- التجوية والتعرية ودورة الصخور

بعد أن تتكون الجبال نتيجة للعمليات التكتونية (البنائية) والنشاط البركانى ، يعمل التغيير الكيميائى والتهشيم الطبيعى بالأمطار والرياح والجليد وحركة هذه المواد أسفل المنحدرات على سطح الأرض على تعرية هذه الجبال ، وهذا هو دور التعرية.

وتعرف التعرية **erosion** بأنها مجموعة العمليات التى تؤدى إلى تفكك الصخور والتربة وتحركها بواسطة الرياح أو الجليد أو الماء على المنحدرات إلى الأماكن المنخفضة . وتحمل المواد التى تم تجويتها بعيدا لتترسب فى مكان آخر على سطح الأرض ، مما يترتب عليه كشف صخور جديدة وتعريضها للتجوية .

وتعمل التجوية والتعرية مع العمليات البنائية والتبركن وغيرها من العناصر الأخرى لدورة الصخور على تغيير شكل سطح الأرض . فبينما يعمل النشاط البركانى والتكتونى على رفع أجزاء من سطح الأرض ، فإن عمليات التجوية والتعرية تعمل بصورة عكسية ، حيث تزيل المواد من المرتفعات إلى مناطق أقل ارتفاعا

باستمرار . كما تؤدى أيضا إلى تحويل الصخور المختلفة إلى رواسب وتكوين التربة أيضا . وينتج عن التجوية الكيميائية معظم الأملاح المذابة فى مياه المحيطات .

وسنتناول فى الأجزاء الأولى من هذا الفصل التجوية الكيميائية ، لأنها تمثل العامل الأساسى والمحرك الذى يسيّر كل عمليات التجوية ، كما تعتمد التجوية الطبيعية بدرجة كبيرة، رغم أهميتها ، على التحلل الكيميائى . وسنتناول أولاً العوامل التى تتحكم فى التجوية ، ولماذا تتم تجوية بعض الصخور أسرع من الصخور الأخرى ؟

II. العوامل التى تؤثر فى التجوية

من المعلوم أن كل الصخور قابلة للتجوية ، إلا أنها تتفاوت فى طريقة وسرعة تجويتها ؛ حيث تتجوى بعض الصخور بسرعة أكبر من الصخور الأخرى .

وتتحكم فى عملية تفتيت الصخور وتغييرها كيميائيا أربعة عوامل رئيسية وهى: خصائص (صفات) الصخر الأصلى والمناخ ووجود التربة أو عدم وجودها والفترة الزمنية التى يتعرض فيها الصخر للعوامل الجوية . ونعرض فيما يلى وصفا لكل من هذه العوامل (جدول 1.6).

أ. خصائص الصخر الأصلى

تؤثر طبيعة الصخر الأصلى على معدل تجوية الصخور ؛ وذلك يرجع أساسا إلى نوع المعدن ، حيث تتم تجوية المعادن المختلفة بسرعات مختلفة . كما يؤثر تركيب الصخر structure على قابليته لتكوين الشروخ والكسور . وتقدم الحروف المنقوشة على شواهد القبور القديمة والمحفورة منذ عدة قرون أوضح دليل على أن تجوية الصخور تتم بسرعات

جدول (1.6): العوامل الرئيسية التى تتحكم فى معدلات التجوية

	معدل التجوية: بطىء	←	سريع
خصائص الصخر الأصلى			
قابلية ذوبان المعدن	منخفضة (مثل الكوارتز)	متوسطة (مثل: البيروكسين والفلسبار)	عالية (مثل : الكالسيت)
تركيب الصخر	كتلى	به بعض نطاقات الضعف	به كسور عديدة أو مكوّن من طبقات رقيقة
المناخ			
هطول الأمطار	منخفض	متوسط	غزير
درجة الحرارة	باردة	معتدلة	ساخنة
وجود أو عدم وجود تربة			
سمك طبقة التربة	منعدمة- الصخر عار	رقيق إلى متوسط	سميك
النشاط العضوى	ضئيل	متوسط	وفير
فترة التعرض	قصيرة	متوسطة	طويلة

مختلفـة؛ فـالحروف المنقوشـة عـلى شـواهد القبـور الحديثة تبدو واضحة على سطح صخر الحجـر الجـيرى وذات حدود حادة . أما بعد مئات السنين ، وفى طقـس تعرض فترة كافية لعوامل التجوية . فالآثـار الجرانيتيـة ستبدو الكتابة عليها باهتة وغير واضحة بعد عدة مئات من السنين، حيث تبدأ بلورات الفلـسبارات فى التآكـل



شكل (2.6): أثر التجوية على الأنواع المختلفة من الصخور ، كـما توضـحه شـواهد القبـور المقامـة فى أوائـل القـرن التاسـع عـشر فى ولايـة ماساشوستس فى أمريكا . فقد تجوى الشاهد المصنوع من الحجر الجيرى (على اليمين) بدرجة لا يمكن قراءة الكتابة عليه ، بينما احتفظ الـشاهد المصنوع من الإردواز (على اليسار) بالكتابة تحت نفس الظروف.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ممطر فإنها تبدو باهتة ، كما لو أن الحروف المنقوشة عليها قد أزيلت ، مثلما تزال الكتابة من عـلى قطعـة الـصابون بعـد اسـتعمالها عـدة مـرات . أمـا لوحـات الإردواز والجرانيت فلا يظهر عليها إلا القليل من التغير (شـكل 2.6) . ويعكس الاختلاف فى تجوية صخرى الجرانيت والحجر الجيرى الاختلاف فى قابلية ذوبـان solubility المعادن المكوّنة لها فى الماء . ومـع ذلـك ، فـإن الـصخر المقاوم للتغير يمكن أن يتغير ويتحلـل تحلـلا كـاملاً إذا لتتحول إلى معادن جديدة ، بينما يبقى معـدن الكـوارتز دون أى تغيير .

كـما يـؤثر تركيـب الـصخر structure أيـضا فى التجوية الطبيعية . فقد بقيت الآثار الفرعونيـة القديمـة المصنوعة من الجرانيت سليمة وغير مكسرة أو مـشرخة لعدة قرون بعد تشييدها ، بينما على العكس مـن ذلـك ، قد يتكسر الـصخر المكـوّن مـن الطفـل ، وهـو صـخر

رسوبى ، بسهولة على امتداد مستويات التطبق إلى قطع صغيرة .

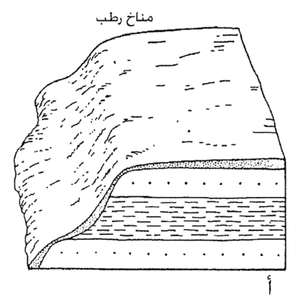
ب. المناخ : هطول المطر ودرجات الحرارة

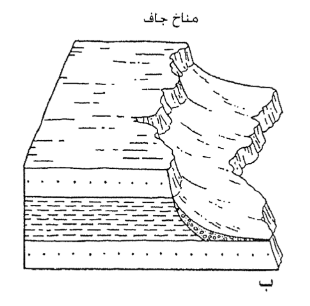
يتحكم المناخ بدرجة كبيرة فى معدل التجوية الكيميائية . ويؤثر هطول الأمطار (رطوبة الجو) وتغير درجة الحرارة على سرعة التجوية ، حيث تعمل الحرارة والرطوبة المرتفعة على تنشيط التفاعلات الكيميائية . ولذلك فإنه ليس من المستغرب أن تكون التجوية أشد قوة وتعمل على أعماق أكبر فى الأرض ، فى مناطق المناخ الدافئ الرطب عنها فى مناطق المناخ الجاف البارد . ففى المناطق الاستوائية الرطبة مثل وسط أمريكا وجنوب شرق آسيا تبدو التجوية الكيميائية واضحة ، بينما فى المناطق الباردة الجافة مثل شمال جرينلاند والقارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) تكون التجوية الكيميائية بطيئة جداً . وعلى العكس من ذلك ، فإن التجوية الطبيعية تكون واضحة فى تلك المناطق الباردة الجافة نتيجة تأثير الصقيع ، حيث يكسى سطح الأرض بأكوام من الحجارة المزاحة .

ويظهر تأثير المناخ climate فى الاختلاف الواضح فى نواتج تجوية الصخور الكربوناتية . فالصخور الجيرية التى تتكون من معدن الكالسيت القابل للذوبان بسهولة مثل الحجر الجيرى والرخام ، تكون سريعة التأثر بالتجوية الكيميائية فى المناخ الرطب ، مما يؤدى إلى تكوين معالم طوبوغرافية منخفضة ولطيفة الانحدار . أما فى المناخ الجاف ، فإن هذه الصخور تكون طوبوغرافية حادة ، عبارة عن جروف (الجرف منحدر صخرى شديد) (شكل 3.6) ؛ حيث تؤدى ندرة المطر وشح الغطاء النباتى إلى قلة حامض الكربونيك القادر على إذابة المعادن الكربوناتية .

ج. وجود أو عدم وجود التربة

تعتبر التربة أحد أهم المصادر الطبيعية المهمة لأى دولة . وتتكون التربة soil من كسرات من صخر





شكل (3.6): تأثير المناخ على المنحدرات وشكل مقطع الأودية

(أ) فى المناخ الرطب ، تتغطى الطبقات الصخرية بغطاء من الصخور التى جويت كيميائيا ، وتكون المنحدرات لطيفة الانحدار .

(ب) فى المناخ الجاف ، تكوّن الطبقات الصخرية المقاومة للتعرية هضابا وجروفا ، وتكون المنحدارات شديدة الانحدار.

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الأساس **bedrock** (الصخر الصلد المتصل والموجود تحت الرواسب المتراكمة غير المتصلدة) ومعادن الصلصال المتكونة من تغيير معادن صخر الأساس والمادة العضوية الناتجة من الكائنات العضوية التى تعيش فيها . وعلى الرغم من أن التربة تنتج من عملية التجوية ، إلا أن وجودها أو عدم وجودها يؤثر على التجوية الفيزيائية والكيميائية للمواد الأخرى ؛ فالمعدن الموجود فى تربة وادى منخفض مغطى بالتربة يتحلل أسرع ، مما إذا وجد فى جرف قريب لايغطيه أى نوع من التربة ، حيث تحمل الأمطار الحبيبات المفككة إلى مناطق منخفضة يمكن أن تتراكم فيها تلك الحبيبات .

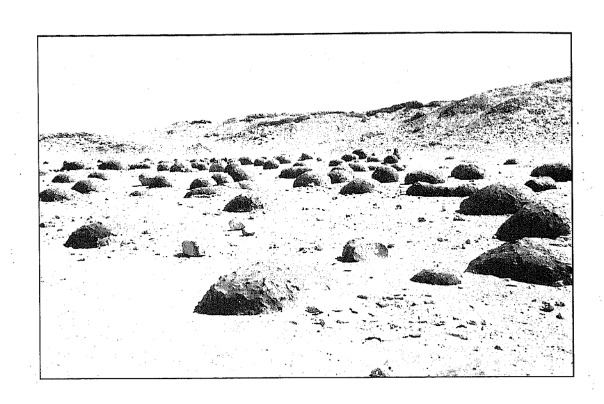
وتتكون التربة نتيجة عملية استرجاع موجبة ؛ أى إن التربة وهى ناتج عملية التجوية تساعد فى تقدم التجوية . فبمجرد أن تبدأ التربة فى التكوّن ، فإنها تدخل كأحد العوامل الجيولوجية التى تعمل على تجوية الصخور بسرعة أكبر. وتحتفظ التربة بمياه الأمطار وأنواع مختلفة من النباتات، والكثير من البكتريا والكائنات الحية الأخرى ، التى تعمل على تكوين بيئة حامضية تنشط التجوية الكيميائية ، وهى تعمل على تغيير وإذابة المعادن ، كما تساعد جذور النباتات والكائنات الحية المتحركة خلال التربة على التجوية الفيزيائية بما تحدثه من شقوق وكسور . وتعمل التجوية الطبيعية والكيميائية بدورهما على إنتاج المزيد من التربة.

د. الزمن: فترة التعرض

من الطبيعى أنه كلما كانت الفترة الزمنية التى تتعرض فيها الصخور للتجوية أطول ، زادت نسبة تغيرها وإذابتها وتكسرها . فالصخور التى انكشفت على سطح الأرض لعدة آلاف من السنين يتكون فوقها لحاء (قشرة) ، وهى طبقة خارجية من المواد الناتجة من التجوية يتراوح سمكها بين عدة ميلليمترات وعدة سنتيمترات ، وتحيط بالصخر الذى لم يتغير أو يتجوى . وتتكون هذه اللحاءات ببطء يصل إلى 0.006 مم كل ألف سنة فى المناخ الجاف، بينما تكون فترة تعرض اللابات ورواسب الرماد البركانى المنبثق حديثا من البراكين على سطح الأرض قصيرة جدا ، ولذلك تكون تقريبا غير مجواة .

ويؤثر مجموع العوامل السابقة فى تحديد نوع ومعدل تجوية الصخور فى أى منطقة . ويوجد عموما بعض الاختلاف والتباين فى تجوية الصخور ، حتى على مستوى منطقة صغيرة نسبيا من الأرض . **والتجوية المتفاوتة differential weathering** هى تجوية الصخور المنكشفة على سطح الأرض بمعدلات مختلفة أو غير منتظمة ، بسبب الاختلاف فى صلابة ومقاومة مواد السطح . وتتآكل الصخور الأقل صلابة ومقاومة بمعدلات أسرع ، فى حين تظل الصخور الأصلب بارزة وناتئة . وتؤدى التجوية المتفاوتة والتعرية اللاحقة لها إلى تكوّن عديد من الأشكال والمعالم الأرضية ، مثل الجسور الطبيعية natural bridges الموجودة فى يوتا بالولايات المتحدة الأمريكية . كما تشمل تلك المعالم الأرضية أيضا **حقول الجلاميد boulder fields** ، وهى مساحات واسعة جدا عادة ومسطحة تنتشر عليها الجلاميد المستديرة . ويعزى وجود هذه الجلاميد إلى التجوية الكيميائية ، إذ إن معظم الصخور تحمل درنات صخرية concretions مختلفة الأحجام من مادة مختلفة عن الصخور (عادة من الصوان) تكون أكثر صلادة من الحجر الجيرى . وعند تعرض الصخر الأصلى للتجوية الكيميائية نتيجة لتأثير المياه الجوفية أو مياه الأمطار ، فإن المكونات الجيرية تذوب بمعدل أسرع من معدل ذوبان الدرنات التى قد لا تستجيب للتجوية الكيميائية . وبذلك يتآكل الصخر

الأصلى مخلفا وراءه كميات كبيرة من الدرنات المختلفة الحجم . ومن أمثلة ذلك حقول الجلاميد الموجودة فى شمال الواحات البحرية ، وتلك الموجودة على طريق أسيوط - الخارجة بالصحراء الغربية المصرية



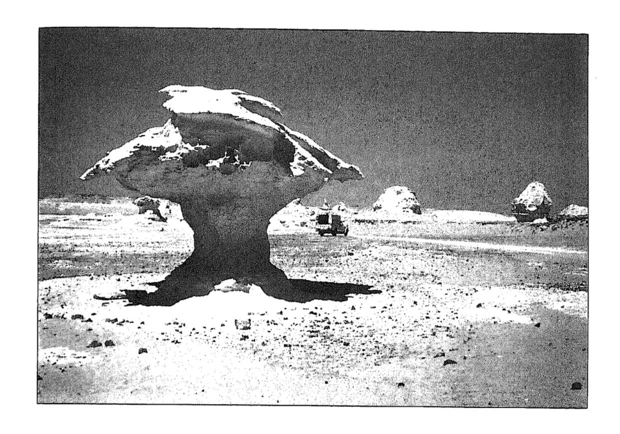
شكل (4.6) : حقول الجلاميد boulder fields على طريق أسيوط-الخارجة ، الصحراء الغربية – مصر .

(شكل 6. 4) . كما تشمل تلك المعالم الأرضية أيضا ما يسمى **بصخور عيش الغراب (موائد الشيطان) mushroom rocks** ، وهى تنتج عندما توجد طبقة من صخر صلد تعلو طبقة أخرى من صخر أقل صلادة، فتتآكل الطبقة السفلى بمعدل أسرع بفعل الرياح من معدل تآكل الطبقة العليا . وخير مثال على تلك الموائد ما يوجد منها فى الصحراء البيضاء White Desert فى شمال واحة الفرافرة بالصحراء الغربية المصرية ؛ حيث تؤدى التجوية المتفاوتة لصخور الطباشير إلى تكوين تلك الموائد (شكل 6. 5) .

III. التجوية الكيميائية

عندما تتعرض المعادن المكوّنة للصخور النارية والمتحولة ، والتى تكونت أصلا عند درجات حرارة وضغط عاليين ، لدرجات حرارة وضغط أقل عند سطح الأرض ، فإنها تصبح غير مستقرة كيميائيا . وتتحلل مثل هذه المعادن إلى مكونات ، تعطى معادن جديدة أكثر استقرارا عند سطح الأرض أو بالقرب منها.

وتحدث تفاعلات كيميائية عديدة أثناء التجوية الكيميائية بين المعادن المكوّنة للصخور المختلفة ومكوّنات الهواء والماء ؛ حيث تؤدى تجوية الصخور إلى إذابة بعض المعادن المكوّنة للصخور ، بينما يتحد بعضها الآخر مع الماء وغيره من مكوّنات الغلاف الجوى مثل الأكسجين وثانى أكسيد الكربون ، لتتكون مركبات



شكل (5.6): صخور عيش الغراب (موائد الشيطان) mushroom rocks ، وهى تنتج من تآكل صخور الطبقة السفلى الأقل صلادة عن صخور الطبقة العليا بفعل الرياح ، الصحراء البيضاء – الفرافرة – مصر .

كيميائية هى عبارة عن معادن جديدة . وتكون التجوية الكيميائية أكثر وضوحا فى المناطق التى تكون درجات الحرارة وسقوط الأمطار فيها عالية ، حيث إن تلك العوامل تزيد من سرعة التفاعلات الكيميائية .

أ – عمليات التحوية الكيميائية

التحلل المائى: عندما يتساقط ماء المطر من الغلاف الجوى ، فإنه يذيب كميات صغيرة من ثانى أكسيد الكربون ويتكون **حامض الكربونيك carbonic acid** . وعندما يتحرك هذا الماء المحتوى على حامض الكربونيك الضعيف فى التربة ، فإنه يذيب كميات إضافية من ثانى أكسيد الكربون المتكوّن نتيجة تحلل بقايا النباتات والحيوانات ، بالإضافة إلى أحماض أخرى. ويتأين حامض الكربونيك ليكوّن أيونات هيدروجين وبيكربونات حسب المعادلة التالية:

$$H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^{1+} + HCO_3^{1-}$$

ماء — ثانى أكسيد كربون — حامض الكربونيك — أيون هيدروجين — أيون بيكربونات

وأيونات الهيدروجين هى أيونات صغيرة جدا تحمل شحنة واحدة موجبة بدرجة تسمح بأن تحل محل الأيونات الموجبة الأخرى مثل Ca^{2+}، أو Na^{1+} أو K^{1+} داخل البنية البلورية للمعادن . ويؤدى هذا الإحلال إلى تغير التركيب المعدنى للمعدن وتحطيم بنيته البلورية. وغالبا ما يتحلل المعدن إلى معدن آخر مختلف عندما يتعرض لحامض ما .

وتوضح المعادلة التالية الطريقة التى يتحلل بها معدن الفلسبار البوتاسى، وهو أحد المعادن المكوّنة للصخور الشائعة، بواسطة حامض الكربونيك وتأثير أيون الهيدروجين H^{1+} فى تحلل المعادن (شكل 6.6):

$$4KAlSi_3O_8 + 4H^{1+} + 2H_2O \rightarrow$$

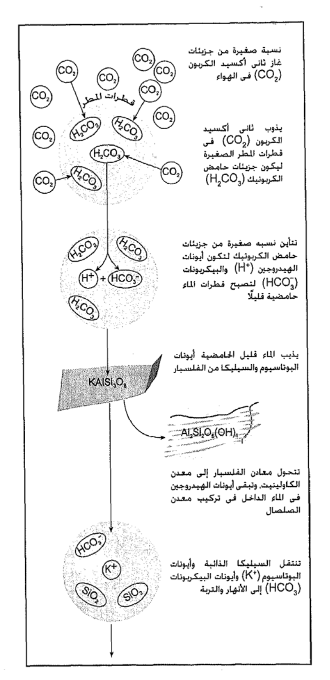
فلسبار بوتاسى — أيونات هيدروجين — ماء

$$4K^{1+} + Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 8SiO_2$$

أيونات بوتاسيوم — كاولينيت — سيليكا

فتدخل أيونات الهيدروجين H^{1+} فى معدن الفلسبار البوتاسى، وتحل محل أيونات البوتاسيوم التى يحملها السائل خارج البلورة، بينما يتحد الماء مع جزئ سيليكات الألومنيوم المتبقى ليكوّن معدن الكاولينيت (سيليكات الألومنيوم المائية) نتيجة للتجوية الكيميائية، حيث لم يكن موجودا فى الصخر الأصلى. ويسمى هذا التفاعل الذى يكتسب فيه الفلسبار الماء بالتميؤ **hydration**. ومعدن الكاولينيت أحد معادن مجموعة الصلصال الشحيحة الذوبان التى تكون جزءا أساسيا من الحطام الصخرى (الأديم) فوق سطح الأرض. ويسمى التفاعل الكيميائى الذى تحل فيه أيونات الهيدروجين H^{1+} أو الهيدروكسيل OH^{1-} من الماء، محل أيونات فى المعدن **بالتحلل المائى hydrolysis**. وتعتبر هذه العملية إحدى عمليات التجوية الكيميائية الرئيسية التى تسبب تحلل الصخور الشائعة.

الغسل: يعتبر الغسل **leaching** من العمليات الشائعة فى التجوية الكيميائية، وهو يعبر عن الإزالة المستمرة للمواد المذابة بالمحاليل المائية من صخر الأساس bedrock أو الحطام الصخرى (الأديم) regolith. وعلى سبيل المثال، فعندما تتحرر السيليكا من الصخور نتيجة التجوية الكيميائية، فإن بعضها يبقى فى الحطام الصخرى الغنى بمعادن الصلصال،



شكل (6.6) تجوية الفلسبار البوتاسى بحامض الكربونك المتكوّن نتيجة وجود ثانى أكسيد الكربون فى ماء المطر. وتؤدى التجوية إلى تكون ناتجين: الكاولينيت وهو أحد معادن الصلصال، ومحلول يحتوى على سيليكا ذائبة وأيونات بوتاسيوم وايونات بيكربونات.

وبعضها الآخر تحمله المياة المتحركة فى الأرض ببطء . ويتم أيضاً حمل عديد من أيونات البوتاسيوم الناتج من تجوية الصخور فى المحاليل . وتوجد الأيونات التى تم إذابتها من الصخور أثناء التجوية فى كل المياه السطحية والمياه الجوفية تحت سطح الأرض . وقد يزيد تركيز هذه الأيونات بدرجة كبيرة بحيث تجعل للماء طعما غير مستساغ.

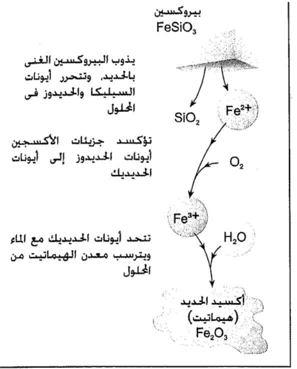
الأكسدة: يتكون الصدأ عندما يتحد الأكسيجين مع الحديد ليكون أكسيد الحديد، كما يلى:

$$4Fe + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$$

حديد   أكسيجين   هيماتيت

ويحدث هذا التفاعل الكيميائى والذى يطلق عليه الأكسدة **oxidation** عندما يفقد عنصر ما إلكترونات خلال التفاعل . ويقال فى هذا التفاعل ، إن الحديد قد تأكسد لأنه فقد إلكترونات اكتسبها الأكسيجين. ويتأكسد الحديد ببطء شديد فى البيئة الجافة ، بينما تزيد إضافة الماء من سرعة التفاعل بدرجة كبيرة .

والأكسدة عملية مهمة فى تحلل المعادن ، مثل مجموعة المعادن الحديدوماغنيسية (الأوليفين والبيروكسينات والأمفيبولات والبيوتيت) . وفى معادن السيليكات الحديدوماغنيسية لابد أن ينفصل الحديد أولاً من السيليكا فى البنية البلورية للمعدن قبل أن يتأكسد (شكل 7.6). وأكسيد الحديد المتكوّن هو معدن الهيماتيت (Fe_2O_3) ، الذى يتميز مسحوقه بلون بنى محمر. وفى وجود الماء ، كما هو الحال عند سطح الأرض غالبا، فإن أكسيد الحديد يتحد مع الماء ليتكون الليمونيت limonite ، وهو اسم لمجموعة من أكاسيد الحديد المائية، والتى تكون غير متبلورة غالبا (تحتوى غالبا على معدن الجوثيت) ، والتى يتميز مسحوقها بلون بنى مصفر. والرمز العام لتلك المجموعة هو $Fe_2O_3\ nH_2O$ (ويمثل الرمز n رقما صحيحا صغيرا مثل 1 أو 2 أو 3 ليوضح كمية الماء المتغيرة).



شكل (7.6): التفاعلات الكيميائية التى يتجوى بها معدن غنى بالحديد ، مثل : البيروكسين ، فى وجود الأكسيجين والماء .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

الذوبان: إن معدن الأوليفين الذى يتم تجويته بسرعة بالنسبة لباقى معادن السيليكات، يكون بطىء الذوبان نسبيا ، مقارنة بالمعادن الأخرى المكونة للصخور. فالحجر الجيرى والمكوّن من معادن كربونات الكالسيوم والماغنسيوم (كالسيت ودولوميت) هو إحدى الصخور التى يتم تجويتها بسرعة كبيرة فى المناطق الرطبة. ويظهر على المبانى الجيرية القديمة أثر الذوبان بسبب مياه الأمطار . وتذيب المياه الجوفية كميات كبيرة من معادن الكربونات فى صخور الحجر الجيرى وتجوفها لتكوّن كهوفًا فى هذه الصخور. ويستخدم المزارعون الحجر الجيرى ليعادل الحامضية فى التربة بسبب قابلية الحجر الجيرى للذوبان بسرعة . ويلاحظ أنه عندما يذوب الحجر الجيرى النقى

لا يتكون الصلصال وتذوب الأجزاء الصلبة تماما ، وتحمل مكوناتها فى السوائل ويطلق على هذه العملية الإذابة **dissolution** ، وهى من عمليات التجوية الكيميائية المهمة . ويزيد وجود حامض الكربونيك من إذابة الحجر الجيرى ، بالإضافة إلى تجوية المعادن السيليكاتية . وتمثل المعادلة التالية التفاعل الذى يذوب فيه الكالسيت ، وهو المعدن الرئيسى فى الحجر الجيرى، فى مياه الأمطار أو أى مياه أخرى تحتوى على ثانى أكسيد الكربون:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \longrightarrow$$

كالسيت — حامض الكربونيك

$$Ca^{2+} + 2(HCO_3)^{1-}$$

أيون كالسيوم — أيون بيكربونات

ب. تأثير التجوية الكيميائية على الصخور الشائعة

تعتمد المعادن والأيونات القابلة للذوبان ، والتى تتكون عندما يتم تجوية صخر نارى كيميائياً ، على التركيب المعدنى للصخر. فمحتوى الجرانيت من السيليكا أعلى منه فى البازلت ، كما أن تركيبهما المعدنى مختلف . ويحتوى صخر الجرانيت على الكوارتز، وهو غير نشط فى التفاعل كيميائيا ، بالإضافة إلى المعادن التى تحتوى على البوتاسيوم مثل الفلسبار البوتاسى والمسكوفيت وقليلاً من المعادن الغنية فى الحديد والماغنسيوم. وعندما يتحلل صخر الجرانيت بالتحلل المائى ، حيث يتم تجوية الفلسبار والميكا والمعادن الحديدومغنيسية إلى معادن الصلصال والأيونات الذائبة Mg^{2+}, K^+, Na^+ ، ويتبقى معدن الكوارتز ، وهو غير نشط كيميائيا ، دون تحلل . ويتم تجوية الفلسبار والمعادن الحديدوماغنيسية فى صخر البازلت إلى معادن الصلصال والأيونات الذائبة Mg^{2+}, Ca^{2+}, Na^+ بينما يتم تجوية معدن الماجنيتيت إلى الجوثيت.

وعندما يتم تجوية الحجر الجيرى بالإذابة ، وهو أكثر صخور الكربونات شيوعا ، فإن أيونات الكالسيوم والبيكربونات ستذوب من الصخور مخلفة الشوائب غير القابلة للذوبان فقط (أساسا معادن الصلصال clay minerals والكوارتز) ، والتى تتواجد دائما بكميات صغيرة فى الصخر. لذلك ، فإنه عندما يتم تجوية الحجر الجيرى كيميائيا ، فإن الغلاف الصخرى المتبقى يتكون أساسا من معادن الصلصال والكوارتز.

1 - تركيز المعادن المستقرة

هناك عدد من المعادن ، ومنها معدن الكوارتز ، تكون مقاومة بشدة للتجوية الكيميائية عند سطح الأرض . وتبقى بعض المعادن المقاومة للتجوية الكيميائية مثل الذهب والبلاتين والماس فى الحطام الصخرى الذى تم تجويته ؛ حيث يتم تعريته وتكوّن راسبا. وتتميز بعض هذه المعادن بكثافة نوعية أعلى من المعادن الأخرى الشائعة مثل الكوارتز. ولذلك فإنه يتم تركيزها ضمن طبقات الأنهار أو المجارى المائية عموما أو على امتداد شواطئ البحار . وقد يتم تركيز بعض هذه الرواسب بدرجة تسمح بتكوين رواسب معدنية ذات قيمة اقتصادية.

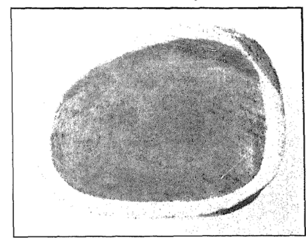
2 - لحاء التجوية

إذا كسرت حصاة كبيرة (جليمود) من البازلت الذى تم تجويته ، فإننا نرى عادة لحاءً فاتح اللون يحيط بلب أغمق لونا من صخر لم يتغير (شكل 8.6) . ويتكون هذا اللحاء من نواتج صلبة تكونت نتيجة التجوية الكيميائية وتسمى لحاء تجوية **weathering rind**. وتبدأ التجوية عند السطح المنكشف غير المجوى ويمتد ببطء إلى الداخل . وتشمل عادة تلك التجوية أكسدة المعادن الغنية بالحديد ونزع (إزالة) الماء dehydration من هيدروكسيد الحديديك لتكوّن

الجوثيت goethite مما يعطى للحاء المتكوّن لونا بنيا فاتحا. كما توضح المعادلة التالية:

$$Fe(OH)_3 \longrightarrow FeO(OH) + H_2O$$

هيدروكسيد حديديك — جوثيت — ماء



شكل (8.6): حجر من البازلت يبين لحاء تجوية weathering rind يبلغ سمكه 2 مم، يحيط بلب أسود لم تتم تجويته، من شرق كاسكادرينج فى واشنطن.

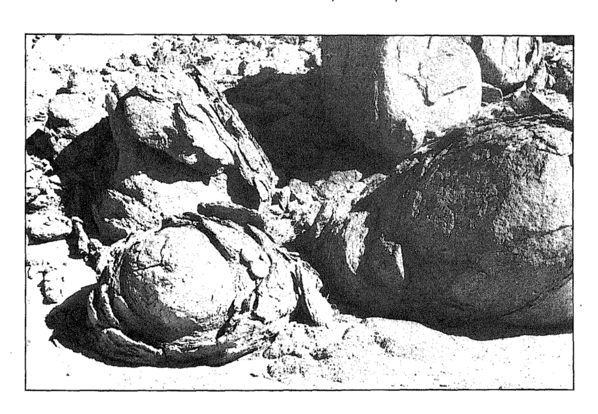
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

3 - التقشر والتجوية الكروية

قد تنخلع أغلفة متحدة المركز من السطح الخارجى لصخور منكشف أو جلمود صخرى، فى عملية تعرف بالتقشر **exfoliation** (شكل 9.6). ويوجد أحيانا غلاف واحد من القشور، كما قد تتكون عشرة أغلفة أو أكثر، مما يعطى الصخر مظهر البصل.

وينتج التقشر من الضغوط المتباينة فى الصخر والتى تنتج أساسا من التجوية الكيميائية. فمثلا، عندما يتم تجوية الفلسبارات إلى الصلصال، فإن حجم الصخر المجوى يكون أكبر من حجم الصخر الأصلى. وتتسبب الضغوط المتكونة فى انفصال أغلفة رقيقة من الصخر من كتلة الصخر الرئيسية غير المجواة.

وتؤدى التجوية الكيميائية تحت سطح الأرض إلى تكوّن هالة من الصخر المتحلل حول لب صخرى غير متحلل. فإذا بدأنا بمكعب من صخر صلب لم يتم



شكل (9.6): كتل مستديرة من صخر الجرانيت بمنطقة جبل العنيجى بالصحراء الشرقية بمصر، توضح وجود عدة أغلفة تشبه البصل، تكونت نتيجة عمليتى التقشر exfoliation والتجوية الكروية spheroidal weathering.

تجويته، فإن الماء المتحرك على امتداد الفواصل يتفاعل مع الصخر من كل الجوانب، حيث يقل حجم الصخر غير المتحلل ويصبح كروياً (شكل 9.6) فى عملية تعرف بالتجوية الكروية **spheroidal weathering** . ويمكن رؤية الجلاميد المتكونة نتيجة التجوية فوق الأسطح غير المجواة . ونلاحظ هنا علاقتين مهمتين هما أن تأثير التجوية الكيميائية يزداد كلما زادت مساحة السطح المعرض للتجوية . فتقسيم مكعب من الصخر يزيد مساحة السطح المعرض للتجوية دون أى إضافة إلى حجم هذا المكعب (شكل 10.6) . وتؤدى عملية التقسيم المستمر والمتكرر إلى تأثير ملموس فى الصخور . فعندما يقسم مكعب من الصخر طول ضلعه 1 سم ومساحة سطحه 6 سم^2 إلى أقسام فى حجم معادن الصلصال الصغيرة ، فإن مساحة السطح تزداد إلى نحو 40 مليون سم^2 . وهكذا تؤدى عملية التجوية الكيميائية إلى زيادة واضحة فى مساحة السطح المعرض ، مما يؤدى إلى استمرار وزيادة عملية التجوية.

4 - أشكال السطح نتيجة التفاعل مع صخور الكربونات

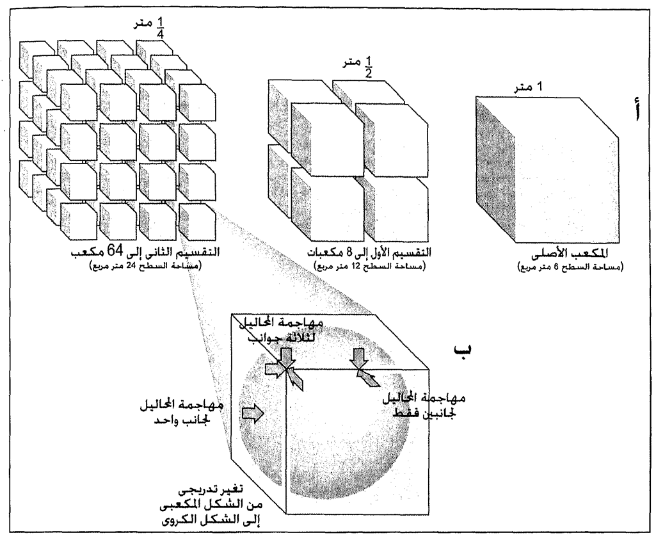
يؤدى تفاعل حمض الكربونيك مع الحجر الجيرى إلى تكون العديد من أشكال السطح، والتى تكون غالباً ذات أبعاد صغيرة . وتتكون على مكاشف الحجر الجيرى أشكال مختلفة مثل التجاويف القاعية cups والتى تأخذ شكل الفنجان ، والأخاديد grooves والقنوات الضحلة flutes فى نمط متشابك . وقد تمنع الأخاديد العميقة والصخور التى تشبه الحوائط المعلقة مرور الناس خلالها. وتؤدى إذابة حامض الكربونيك للحجر الجيرى إلى تكون كهوف تحت سطح الأرض بالإضافة إلى معالم أرضية مميزة تتكون نتيجة انهيار الكهوف تحت سطح الأرض. وسوف يتم مناقشة تلك الملامح الطوبوغرافية فى الفصل الثالث عشر الذى يناقش المياه الجوفية .

جـ. الاستقرار الكيميائى: التحكم فى سرعة التجوية

على الرغم من أن الصخور المكوّنة من السيليكات تغطى مساحات أكبر بكثير من تلك التى تغطيها الصخور الكربوناتية ، إلا أن تجوية الحجر الجيرى تمثل أكبر نسبة من التجوية الكيميائية لسطح الأرض عن أى صخر آخر . ويرجع السبب فى ذلك إلى أن المعادن الكربوناتية تذوب أسرع وبكميات كبيرة عن أى سيليكات . وتغطى معدلات التجوية للمعادن مدى كبير يتراوح من المعدلات السريعة للكربونات إلى المعدل البطىء للكوارتز . وتعكس المعدلات المختلفة التى تتم عندها تجوية المعادن مدى الاستقرار الكيميائى للمعادن فى ظروف التجوية - أى وجود الماء عند درجات حرارة سطح الأرض .

1 - الاستقرار الكيميائى

يعرف الاستقرار الكيميائى chemical stability بأنه قياس قابلية مادة كيميائية ما لأن تبقى فى شكل كيميائى معين فضلاً عن أن تتفاعل تلقائيا لتكوّن شكلا كيميائيا آخر. ويمكن تشبيه هذا الاستقرار الكيميائى لحد ما بالاستقرار الميكانيكى . فالكتاب الموضوع على منضدة يكون مستقرا ويستمر فى هذا الوضع ما لم يتم تحريكه . أما الكتاب الموضوع على حافة المنضدة فإنه يكون غير مستقر ، حيث يتسبب أى اهتزاز فى سقوطه. وكما هو الحال مع الكتاب المسطح المستقر ميكانيكيا ، يكون فلز حديد النيازك القادم من الفضاء الخارجى مستقرا كيمائيا ، حيث لا يتعرض لأى أكسيجين أو ماء، ويبقى الحديد مستقرا لبلايين السنين. أما إذا سقط هذا النيزك على الأرض ، فسيتعرض للأكسيجين والماء ليصبح غير مستقر كيميائيا ، ويتفاعل تلقائياً ليكوّن أكسيد حديديك .



شكل (10.6): تقسيم وتجوية مكعبات الصخور

(أ) يُقسم المكعب فى كل مرة عند منتصف كل حافة ، مما يترتب عليه تضاعف مساحة السطح الخارجى منه وزيادة معدل التجوية الكيميائية .

(ب) تهاجم المحاليل المتحركة عبر الفواصل أركان وحواف وجوانب الأشكال المكعبية بمعدل يتناقص بنفس الترتيب ، لأن عدد الأسطح المقابلة والمعرضة لتأثير التجوية هى 3 و 2 و 1 . وتصبح الأركان مستديرة ، وتأخذ المكعبات فى النهاية الشكل الكروى . وبمجرد الوصول للشكل الكروى ، يصبح معدل التجوية متساويا على كل الأسطح ، ولا يحدث تغير يذكر فى الشكل .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

والمواد الكيميائية تكون مستقرة أو غير مستقرة نتيجة علاقتها ببيئة معينة أو تواجدها تحت مجموعة معينة من الظروف . فعلى سبيل المثال : يكون الفلسبار مستقرا عند تواجده فى عمق القشرة الأرضية (أى تحت درجات حرارة مرتفعة وكميات قلية من الماء) ، إلا أنه يصبح غير مستقر تحت الظروف السائدة عند سطح الأرض (درجات حرارة منخفضة ووفرة الماء). وتحدد خاصيتان للمعدن مدى استقراره الكيميائى وهما : قابليته للذوبان ومعدل ذوبانه.

قابلية الذوبان: تقاس قابلية ذوبان **solubility** معدن معين ، بكمية المعدن المذابة فى الماء حتى يصل المحلول إلى نقطة التشبع ـ وهى النقطة التى لا يستطيع عندها الماء أن يحتفظ بأى كمية أخرى من المادة المذابة . وكلما زادت قابلية ذوبان المعدن قلت درجة استقراره

أثناء عملية التجوية . فمثلاً يكون الملح الصخرى (المكون من معدن الهاليت وهو ملح الطعام) غير مستقر عند ظروف التجوية ، حيث إنه يذوب بدرجة عالية فى الماء ويتم غسله وإذابته من التربة بأى كمية صغيرة من الماء . وعلى العكس ، يكون الكوارتز مستقرا بدرجه معقولة تحت معظم ظروف التجوية ، حيث إن ذوبانه فى الماء منخفض جدا (فى حدود 0.008 جرام لكل لتر من الماء تقريبا) ، ولا يغسل أو يذاب من التربة بسهولة.

معدل الذوبان: يقاس معدل ذوبان rate of dissolution معدن ، بكمية المعدن التى تذوب فى محلول غير مشبع فى وقت محدد . وكلما كان ذوبان المعدن أسرع ، كان أقل استقرارا . فالفلسبار يذوب بمعدل أسرع من الكوارتز ، ولذا فهو أقل استقرارا منه عند ظروف التجوية العادية .

2 - سلسلة استقرار المعادن الشائعة المكوّنة للصخور

تكون التجوية الكيميائية شديدة فى الغابات الاستوائية المطيرة ، حيث لا يبقى فى المنكشفات أو فى التربة إلا أكثر المعادن استقرارا. أما فى المناطق الصحراوية الجافة فى شمال إفريقيا ، وكما هو الحال فى الصحارى المصرية ، فإن التجوية تكون ضعيفة ، حيث تبقى الآثار المصنوعة من الألباستر سليمة دون تحلل ، كما تبقى الكثير من المعادن غير المستقرة سليمة . لذلك، فإن معرفة الاستقرار الكيميائى النسبى للمعادن المختلفة تساعد فى توقع مدى التجوية فى منطقة معينة . ولقد تم مقارنة مدى استقرار كل المعادن الشائعة والمكوّنة للصخور وتم تجميعها فى سلسلة تعرف بسلسلة استقرار stability series المعادن (جدول 2.6). وهى تتراوح بين معادن الملح والكربونات عند أقل حد للاستقرار إلى أكاسيد الحديد عند أكبر حد للاستقرار . ويكون وضع معادن السيليكات فى هذه السلسلة عكس وضعها فى سلسلة بوين التفاعلية ، والتى تضم معادن السيليكات مرتبة فى قائمة طبقا للترتيب الذى تتبلور به هذه المعادن من صهارة بازلتية. ويبين جدول (2.6) أيضا سلسلة بوين التفاعلية . ويمكن ملاحظة أن الأوليفين والبلاجيوكليز الكلسى هما أول المعادن تبلورا أثناء تبرد الصهارة ، مما يدل على ثباتها واستقرارهما عند درجات الحرارة والضغوط العالية . وهما أيضا أقل المعادن استقرارا عند التجوية ، وأول المعادن التى تختفى عند تعرضها على سطح الأرض عند درجة الحرارة والضغط المنخفضين .

وتحدد طبيعة الروابط الكيميائية التى تميز البنية البلورية لمعادن السيليكات الاستقرار النسبى لتلك المعادن ، والذى ينعكس خلال سلسلة الاستقرار وأثناء التجوية . وتتكون معادن السيليكات الأقل استقرارا أثناء التجوية من رباعيات السيليكات المفردة . وتميز هذه البنية البلورية معدن الأوليفين الذى يظهر قرب نهاية القائمة الأولى فى جدول (2.6) ، ويلى ذلك سيليكات السلسلة المفردة (البيروكسينات) وسيليكات السلسلة المزدوجة (الأمفيبولات) والتى تعتبر إلى حد ما أكثر استقرارا من الأوليفين . ويلى ذلك فى درجه الاستقرار السيليكات الصفائحية (الميكا ومعادن الصلصال) ، والسيليكات الإطارية (الهيكلية) مثل الكوارتزثم أكاسيد الحديد والألومنيوم.

وبالإضافة إلى الكوارتز ، فهناك أيضا عدد من المعادن الأخرى التى تقاوم بشدة التجوية الكيميائية عند سطح الأرض. ويتم تعرية بعض المعادن مثل الذهب والبلاتين والماس والتى استمر بقاؤها فى الحطام الصخرى الذى تم تجويته ، لتكوّن راسبا فى النهاية. وقد تتركز بعض هذه المعادن ، والتى تتميز بكثافة نوعية أعلى من المعادن الشائعة مثل الكوارتز، فى طبقات المجارى المائية ، أو على شواطئ البحار

والمحيطات مثل الرمال السوداء بمصر. وقد تتركز بعض هذه الرواسب بدرجة كبيرة لتكوّن رواسب معدنية ذات قيمة اقتصادية.

V. التجوية الطبيعية

تكمل التجوية الطبيعية (الفيزيائية) التجوية الكيميائية، حيث تدعم إحداهما الأخرى. ونبدأ بدراسة دور هذه التجوية فى المناطق الجافة، حيث يتضاءل دور التجوية الكيميائية.

أ. التجوية الطبيعية فى المناطق الجافة

تتغطى منكشفات الصخور فى المناطق الجافة بعد تجويتها بفتات مفكك يتكون من حبيبات يصل قطرها إلى عدة مليمترات وجلاميد يزيد قطرها عن المتر. ويعرف هذا التجمع غير المتصلد بالدبش rubble، وهذا التجمع هو المقابل غير المتصلد للبريشيا breccia. ويعكس الاختلاف فى حجم الكسرات الدرجات المختلفة للتجوية الطبيعية، ونمط تكسر الصخور الأصلية نتيجة لاستمرار التجوية الطبيعية، حيث تحدث شروخ فى الكسرات الكبيرة، والتى تتكسر إلى كسرات أصغر، وقد تحدث بعض هذه الكسور على امتداد مستويات الضعف فى الصخر الأصلى. وتتكون حبيبات الرمل عندما تتكسر وتنفصل بلورات المعادن المختلفة عن بعضها البعض، كما فى حالة معدن الكوارتز، أو عندما تتكسر الصخور دقيقة التحبب مثل البازلت. وحبيبات الصلصال هى أدق الحبيبات التى تتكون من التجوية الكيميائية للسيليكات.

جدول (2.6): استقرار المعادن الشائعة تحت ظروف التجوية مقارنة بسلسلة بوين التفاعلية

استقرار المعادن Stability of Minerals	معدل التجوية Rate of weathering	سلسلة بوين التفاعلية Bowen's Reaction Series
أكثر استقرارا	أبطأ	
أكاسيد حديد (هيماتيت)	↓	
هيدروكسيدات ألومنيوم (جبسيت)		آخر المعادن فى التبلور
كوارتز		كوارتز
معادن الصلصال		
ميكا المسكوفيت		مسكوفيت
فلسبار بوتاسى (أرثوكليز)		ألبيت ↑ أرثوكليز ↑
ميكا البيوتيت		بيوتيت
فلسبار غنى بالصوديوم (ألبيت)		فلسبارات البلاجيوكليز / معادن مافية
أمفيبولات		أمفيبول
بيروكسين		بيروكسين
فلسبار غنى بالكالسيوم (أنورثيت)		أنورثيت
أوليفين		أوليفين
كالسيت		
هاليت	↓	
أقل استقرارا	أسرع	أول المعادن فى التبلور

ويظهر فى المناطق الجافة بعض علامات التجوية الكيميائية ، مثل وجود الصلصال والفلسبارات المتغيرة، ولكن الشكل السائد للتجوية فى هذا المناخ هو التجوية الطبيعية . وعلى الرغم من أن التجوية الطبيعية هى التجوية الأكثر شيوعاً فى المناطق الجافة ، إلا أن التجوية الكيميائية تمهد الطريق لتقوم التجوية الطبيعية بهذا الدور . حيث تعمل التغيرات البسيطة فى معدن الفلسبار وغيره من المعادن على إضعاف القوى التى تربط البلورات بعضها ببعض مما يؤدى إلى تكوين شروخ صغيرة ، تتسع تدريجيا ، ثم تنفصل بلورات الكوارتز أو الفلسبار نتيجة عمل كل من التجوية الطبيعية والكيميائية . وعندما تتسع هذه الكسور فى الصخور ويزداد حجمها تنفصل كتل كبيرة من المنكشفات .

ب. التجوية الطبيعية فى باقى المناطق

تساعد التجوية الكيميائية التجوية الطبيعية فى القيام بدورها . وتقوم التجوية الطبيعية بذلك عندما يتخلل الماء والهواء شقوق وقنوات الصخور ، ويتفاعلان مع معادن الصخر مما يؤدى إلى تكسير الصخر إلى قطع أصغر فتتعرض مساحة أكبر للتجوية ، وتزيد بذلك سرعة التفاعلات الكيميائية .

ولا تعتمد التجوية الطبيعية دائما على التجوية الكيميائية ، فهناك عمليات تتكسر فيها كتل الصخور التى لم يتم تجويتها، مثل تجمد الماء فى الكسور . وتؤدى عمليات التكسير الناتجة عن القوى البنائية أثناء عمليات بناء الجبال ، والتى ينتج عنها طى وتكسير الصخور ، إلى جعل هذه الصخور أكثر عرضة للتجوية الطبيعية . ويعمل التكسير الطبيعى وحده على تجوية صخور القمر، حيث يغيب الماء الذى يجعل التجوية الكيميائية ممكنة . وتتكسر الصخور على القمر إلى جلاميد وغبار دقيق نتيجة ارتطام النيازك الكبيرة والصغيرة .

جـ . العوامل التى تحدد طريقة تكسر الصخور

تتكسر الصخور لأسباب عديدة ، منها الإجهاد (الضغط) على امتداد نطاقات الضعف الطبيعية والنشاط الحيوى (بيولوجى وكيميائى) .

1. نطاقات الضعف الطبيعية

تحتوى الصخور على نطاقات ضعف طبيعية تتكسر الصخور على امتدادها. فالصخور الرسوبية مثل الحجر الرملى والطفل تحتوى على هذه النطاقات ممثلة بمستويات التطبق المتكونة بين الطبقات المتعاقبة من الرواسب الصلبة . كما تحتوى الصخور المتحولة مثل الإردوازslate على أسطح متوازية من الكسور تسهل انفصالها عبر تلك الأسطح . وتتميز الصخور الجرانيتية، وبعض الصخور الأخرى بأنها كتلية ـ أى تتكون من كتل كبيرة لايظهر عليها أى تغير فى نوع الصخر أو البنية . وتتميز الصخور الكتلية بوجود أسطح تكسر أو انفصال منتظمة ، وعلى مسافات تتراوح بين متر وعدة أمتار ، يطلق عليها فواصلjoints ، وهى أسطح تشقق طبيعية فى الصخور لا يصاحبها أى زحزحة على جانبيها . وتتكون الفواصل والكسور غير المنتظمة فى الصخور وهى مازالت مدفونة فى أعماق القشرة الأرضية . وتتسع هذه الكسور قليلا بسبب عمليات رفع الصخور تدريجيا إلى سطح الأرض وتجوية الصخور التى تغطيها، مما يؤدى إلى التخلص من وزن الصخور فوقها. وعندما تتسع تلك الكسور قليلا ، فإن كلا من التجوية الكيميائية والطبيعية تعمل على زيادة اتساع هذه الشقوق .

وهناك نوع من الفواصل يتكون نتيجة زوال الضغط الواقع على الصخور . فعندما تنكشف الصخور الجرانيتية المكونة للباثوليث تدريجيا فوق

سطح الأرض ، نتيجة إزالة الوزن الكبير الواقع فوقها فيما يعرف بإزالة الحمل unloading فتتمدد الصخور الجرانيتية لأعلى وتتكون كسور تعرف بالفواصل الفريشية (الفواصل السطحية) sheet joints ، وهي عبارة عن أسطح تمتد موازية لسطح الباثوليث (شكل 11.6).

شكل (11.6): فواصل فريشية sheet joints (سطحية) تكونت نتيجة لزوال الضغط

(أ) باثوليث جرانيتي تعرض للرفع الإقليمي مما أدى إلى تعرض الصخور التي تعلوه للتعرية .

(ب) تؤدي إزالة الحمل unloading إلى زوال الضغط عن الجرانيت وتمدده للخارج ، وتتكون فواصل فريشية (سطحية) متقاربة عند السطح ، مما يؤدي إلى تكون قباب مستديرة .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGrow Hill, Boston).

سطح الأرض
عدة كيلومترات
باثوليث
Batholith
أ
فواصل فريشية
Sheet joints
تقشر
Exfoliation
تقشر
Exfoliation
تمدد
Expansion
رفع المنطقة
ب

2. نشاط الكائنات الحية

تؤثر الكائنات الحية ، مثل : البكتريا وجذور الأشجار والحيوانات الحفارة الآكلة للرواسب ، على كل من التجوية الطبيعية والكيميائية (شكل 12.6) ، حيث تعمل كلها على هدم الصخور وتنشيط التجوية الكيميائية ؛ فالقوى الطبيعية لجذور الأشجار تعمل على توسيع الشقوق والكسور الموجودة في الصخور .

3. التوتد الصقيعي

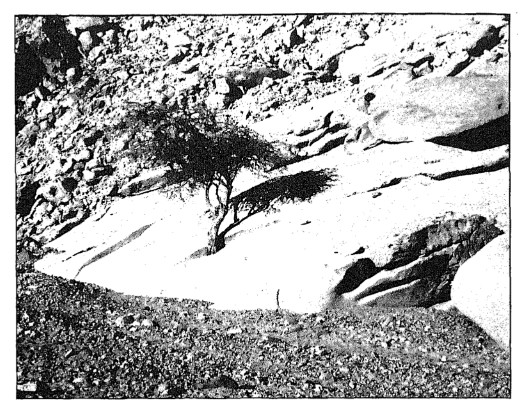
يعتبر التوتد الصقيعي frost wedging أحد أهم وسائل توسيع الشقوق الموجودة في الصخور ، حيث تحدث كسور وتدية بسبب التمدد الناتج عن تجمد الماء. ويتمدد الماء بمقدار 10 ٪ عندما يتجمد . وتحدث هذه الزيادة في الحجم لأن الماء عندما يتجمد فإنه يعيد ترتيب جزيئاته في بنية بلورية مفتوحة ، ويصحب هذا تولد قوى خارجية تكفي لتكسير الصخور حولها .

ويحدث التوتد الصقيعي في أعالي الجبال ، حيث توجد دورة يومية للتجمد والتدفئة. وهنا تتعرض قطاعات صخرية للتهشيم ، وقد تهوي مكونة أكواما كبيرة مخروطية الشكل أسفل المنحدرات تعرف بالركام talus (شكل 13.6) أو ركام المنحدرات.

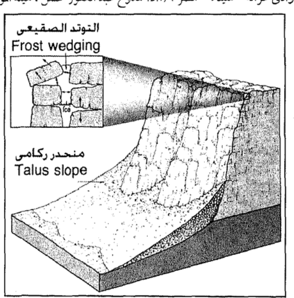
4. تبلور المعدن

بالإضافة إلى العوامل السابقة ، فإننا نلاحظ أنه يمكن أن تتولد قوى تمدد أخرى تؤدي إلى تشقق الصخور وانفصالها عندما تتبلور المعادن من المحاليل في كسور الشقوق أو على امتداد حدود الحبيبات. وتشيع هذه الظاهرة في المناطق الجافة ، حيث تتبلور المواد

الذائبة الناتجة عن التجوية الكيميائية للصخور عند تبخر المحاليل. وقد تكون القوى الناشئة عن بلورات الملح كبيرة جدا إلى درجة تؤدى إلى تفكيك أو تهشيم الصخور. وقد تحدث هذه الظاهرة أيضا عندما تنمو



شكل (12.6): تعمل جذور النباتات كإسفين يساعد على زيادة حجم الكسور فى الصخور وعلى عملية التجوية الميكانيكية mechanical weathering ، صخور الجرانيت فى وادى غزالة - سيناء – مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية) .



شكل (13.6): التوتد الصقيعى Frost wedging . عندما يتجمد الماء فإنه يتمدد ، مما يؤدى إلى تولد قوى تكفى لتكسير الصخر . وعندما يحدث التوتد الصقيعى فى أعالى الجبال أو على الجروف فإن كسرات الصخر المتهشمة تسقط إلى قاع الجرف ، ويتكون تراكم مخروطى الشكل يعرف بالركام talus.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

بلورات الملح أثناء تبخر المياه الجوفية الصاعدة بالخاصية الشعرية وترسب أملاحها الذائبة . وتعتبر كربونات الكالسيوم أكثر هذه المعادن شيوعا ، كما تحتوى على الجبس وملح الطعام.

5. تعاقب الحرارة والبرودة (التمدد الحرارى)

تتكسر الصخور عندما يتعاقب النهار الحار والليل البارد فى المناطق الصحراوية متطرفة المناخ ؛ حيث تنخفض الحرارة من 45 °م أو أكثر إلى 15 °م خلال ساعة واحدة عند الغروب . وقد يكون سبب تكسر الصخور هو ضعف الصخور بسبب تمددها بالحرارة أثناء النهار وانكماشها بالبرودة أثناء الليل.

6. القوى الأخرى

تعمل الأنهار على شق الأودية عبر صخور الأساس، باستخدام الصخور المحمولة فى الضرب المستمر على صخور المجرى ، ثم الاندفاع بقوة عند مساقط المياه أى الشلالات waterfalls أو فى الجنادل rapids (وهى مناطق فى مجرى النهر يكون التيار فيها أسرع من غيرها من المناطق ، ويكون سطحها متكسرا ، إلا أن الانحدار لا يكون كافيا لإحداث شلال) . كما يتم تكسير الصخور بتأثر برى وهدم المثالج ، كما سيتم مناقشة ذلك بالتفصيل فى الفصل 14. وبالإضافة إلى ما سبق ، فإن الأمواج التى تضرب الشواطئ الصخرية بقوة تعادل مئات الأطنان على كل متر مربع ، تقوم بتكسير صخور الأساس المنكشفة أيضا .

د. التجوية الطبيعية والتعرية

ترتبط عمليتا التجوية الطبيعية (الفيزيائية) والتعرية بعضهما ببعض ارتباطا وثيقا . كما تؤثر كل منهما فى الأخرى تأثيرا كبيرا . حيث تقوم التجوية الطبيعية بتكسير الكتل الكبيرة من الصخور إلى قطع صغيرة يسهل نقلها وتعريتها . والخطوات الأولى فى عملية التعرية هى انزلاق الكتل الكبيرة وحمل الحبيبات والكسرات الصخرية الصغيرة فى مياه الأمطار المنسابة على المنحدرات . وتؤثر شدة الانحدار على كل من التجوية الطبيعية والكيميائية ، وهما يؤثران على التعرية. وتحول التجوية والتعرية الشديدتان المنحدرات شديدة الانحدار إلى منحدرات لطيفة الانحدار. وتحمل الرياح الحبيبات الصغيرة بينما يقوم جليد المثالج بنقل الكتل الكبيرة المنزوعة من صخور الأساس لمسافات بعيدة .

ويلاحظ ارتباط أحجام المواد المتكونة بالتجوية الطبيعية بمختلف عمليات التعرية . فقد يتغير حجم المواد الناتجة من التجوية مرة أخرى أثناء النقل ، كما قد يتغير تركيبها الكيميائى نتيجة للتجوية الكيميائية. وعند توقف عملية النقل ، يبدأ ترسيب الرواسب المتكونة من التجوية.

V. التربة: راسب متبق من التجوية

إن كل المواد التى تمت تجويتها لا يتم تعريتها وحملها فى الحال بعيدا بواسطة المجارى المائية أو عوامل النقل الأخرى ؛ فقد تبقى على المنحدرات المعتدلة أو لطيفة الميل والسهول والأراضى منخفضة التضاريس طبقة تغطى صخر الأساس مكونة من المواد المفككة وغير المتجانسة الناتجة من التجوية. وقد تشمل هذه الطبقة حبيبات من الصخر الأصلى التى تمت تجويتها أو لم يتم تجويتها ، ومعادن الصلصال وأكاسيد الحديد وأكاسيد فلزات أخرى ، ونواتج التجوية الأخرى.

ويطلق المهندسون على كل هذه الطبقة مصطلح "تربة". ومع ذلك يفضل الجيولوجيون تسمية هذه المادة بالحطام الصخرى (الأديم)**regolith** ، ويقصرون مصطلح تربة**soil** على الطبقات العليا من الحطام الصخرى ، والتى تحتوى على مواد مفككة مجواة

فوق صخر الأساس **bedrock** وتحتوى على المواد العضوية التى تساعد الحياة النباتية وتعضدها. ويمكن بسهولة تعرف الفرق بين الحطام الصخرى والتربة ، إذا أخذنا فى الاعتبار الحطام الصخرى فوق سطح القمر. ويتكون الحطام الصخرى فوق سطح القمر من طبقة مفككة من الصخور المكسرة والغبار، إلا أنه تنعدم به الحياة . فقد يحتوى على القليل من المواد العضوية أو قد لا يحتوى عليها على الإطلاق . أما المادة العضوية فى تربة الأرض فهى الدوبال**humus** وهى بقايا ونفايات النباتات ، والحيوانات والبكتريا التى تعيش فيها. ويساهم ركام أوراق النبات بنسبة مهمة فى تربة الغابات.

وتختلف ألوان التربة من الأحمر اللامع والبنى ، والمميز للتربة الغنية فى الحديد ، إلى الأسود والمميز للتربة الغنية فى المواد العضوية. كما تختلف التربة أيضا فى مادتها ، فقد تمتلئ بعض التربة بالحصى والرمل. بينما يتكون بعضها الآخر كلية من الصلصال . ولاتتكون التربة على المنحدرات شديدة الميل نظراً لسهولة تعرية التربة ، كما أنها لا تتكون على الارتفاعات العالية بسبب المناخ القارس الذى يمنع نمو النباتات.

ونظراً لأن التربة تمثل جزءا أساسيا من أجزاء البيئة، كما تلعب دورا مهما فى الاقتصاد أيضا ، فقد تطورت دراسة التربة فى القرن العشرين وأصبح لها علم مستقل هو علم التربة **pedology (soil science)** . ويقوم علماء التربة والمهندسون الزراعيون والجيولوجيون والمهندسون المدنيون بدراسة تركيب وأصل التربة ، ومدى صلاحيتها للزراعة والإنشاءات وأهميتها فى تعرف الظروف المناخية التى كانت سائدة فى الماضى. وتركز معظم الدراسات الحديثة على الطرق التى يمكن بها مقاومة تعرية التربة soil erosion.

أ. قطاع التربة

يستغرق تكوين التربة زمنا طويلا يصل إلى مئات أو آلاف السنين . ويعتمد تكوين التربة على كمية الأمطار المتساقطة ودرجات الحرارة ، وأيضا نوع صخر الأساس الذى يحوى ويكوّن التربة ، حيث تزيد درجات الحرارة العالية والرطوبة المرتفعة من سرعة تكوّن التربة . وعندما تنضج التربة تظهر طبقات متميزة من التربة يطلق عليها نطاقات التربة soil horizons . ويطلق على الطبقات أو النطاقات التى تشملها التربة مصطلح قطاع التربة **soil profile** (شكل 14.6) . وتتميز كل طبقة من هذه الطبقات بخواصها اللونية والتركيب الكيميائى ، ويكون الانتقال من أى من هذه النطاقات إلى الآخر غير واضح عادة .

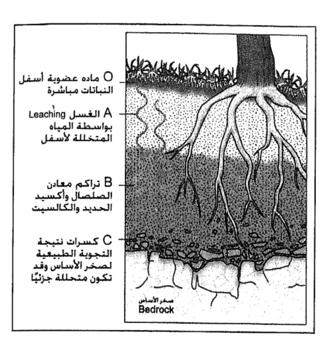
وفيما يلى استعراض لنطاقات التربة الثلاثة:

- **نطاق- أ (A-horizon) أو النطاق العلوى (نطاق الغسل)**

وهو يمثل أعلى طبقة فى قطاع التربة ، ولا يزيد سمكها عن متر أو مترين، وتكون أغمق الطبقات لونا، حيث تحتوى على أعلى نسبة من المادة العضوية . وتكون هذه الطبقة العلوية سميكة فى التربة التى امتد تكوينها على مدى زمنى طويل ، وتتكون من مكونات غير عضوية معظمها معادن صلصال ومعادن غير قابلة للذوبان مثل الكوارتز. أما المعادن الذائبة فقد غسلت وأزيلت من هذه التربة.

- **نطاق ب (B-horizon) أو النطاق الأوسط (نطاق التراكم)**

وتكون المادة العضوية فى هذه الطبقة ضئيلة ومتفرقة ، بينما تتراكم فيها المعادن الذائبة وأكاسيد الحديد فى هيئة عدسات أو تغلف الحبيبات من الخارج.



شكل (14.6): نطاقات التربـة (A, B,C) التـى تتكـون فى المنـاخ الرطب.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

•نطاق ج **(C-horizon)** أو النطاق السفلى

ويتكون من الفتات الـصخرى الناشـئ عـن تكـسر صـخر الأسـاس ، والـذى تغيـر جزئيـا واخـتلط بالصلصال الناتج عن التجوية الكيميائية للصخور .

وتوصف التربـة بأنها إمـا تربـة متبقيـة وإمـا تربـة منقولـة. وتنشأ التربـة المتبقية **residual soil** مـن صخر الأساس ولم تنقل من موضع تكوينها ، وتـشمل النطاقات الثلاث المميزة للتربة . ومعظم التربـة تكـون من نوع التربة المتبقيـة . وحـين تعمـل التجويـة بقـوة ، تتكـون التربـة بـسرعة أكـبر ، وتـصبح أكـبر سـمكا. وتحدث معظم التجوية الكيميائية فقـط خـلال فـترات سـقوط المطر القـصيرة. وتـستمر التفـاعلات خـلال فـترات الجفـاف بـبطء شـديد، بـسبب وجـود بعـض الرطوبة المتبقية فى التربة. وعندما تجف التربة تماما بـين فترات سقوط الأمطار ، فإن التجوية الكيميائية تتوقف تماما تقريبا.

وقد تتراكم التربة المنقولة **transported soil** فى بعض المناطق المحدودة من الأراضى المنخفضة ، وذلك بعد تعرية تلك التربة من المنحـدرات المحيطـة وحملها أسفل تلك المنحدرات. والتربة المنقولة شائعة ، ويمكن أن تختلط مـع الرواسـب العاديـة التـى تكوّنهـا الأنهـار والرياح والجليد . ويمكن تمييز هذه التربة مـن تركيبهـا ونسيجها اللذين يكونان أقرب إلى خواص التربة منهـا للرواسب العادية. وفى بعـض الحـالات تكـون بعـض الأجزاء العليا من قطاع التربة الأصلى موجودا. ويرجع سـمك هـذه التربـة إلى الترسـيب أكثـر مـن التجويـة المتواجدة فى المنطقة المنقولة إليها التربة .

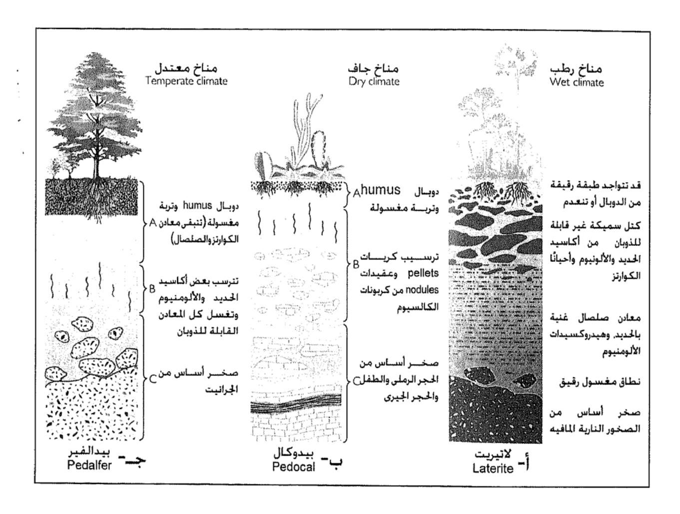
ب. المناخ والزمان وأنواع التربة

يؤثر المناخ بقوة على عملية التجوية ، ولـذلك فـإن له تأثيرا كبيرا على خـصائص التربـة المتكونـة فـوق أى صـخر . فمـثلاً ، تختلـف خـصائص التربـة فى المنـاطق الدافئة والرطبـة عـن تلـك المتكونـة فى المنـاطق الجافـة والمعتدلة . وحيث إن التربة مهمة جدا للزراعة ، لذلك فقد تم إعداد خرائط لخصائص التربة فى معظـم أنحـاء العالم . ولقد أدى هذا إلى مستوى تفصيلى مـن الخـرائط لاستخدامها فى منـع تجويـة التربـة وتـشجيع الزراعـة. وعموما ، فإنه يمكن تمييز ثلاث مجموعات رئيسية مـن التربة على أساس تركيبها المعـدنى والكيميـائى ، الـذى يمكـــن مـــضاهاته بالمنـــاخ (شـــكل 15.6) ؛ أى إن خصائص كل نوع من التربة تعكس الظـروف المناخيـة السائدة وقت تكوّنها .

1. المناخ الرطب : اللاتيريت

تكون التجوية سريعة وشديدة فى المناخـات الدافئـة والرطبة ، حيث تصبح التربة سـميكة. وكلـما ارتفعـت درجة الحرارة وزادت الرطوبـة ، كـان الغطـاء النبـاتى أكثر انتشارا وازدهارا. وتزيد وفرة النباتـات والرطوبـة

والمناخ الدافئ من سرعة التجوية الكيميائية بقوة ، حيث تُغسل كل المعادن القابلة للذوبان وسهلة التجوية من الطبقة العليا من التربة . ويطلق على الراسب المتبقى من هذه التجوية السريعة مصطلح لاتيريت **laterite** ، وهو تربة لونها أحمر داكن حيث تم تغيير الفلسبار والسيليكات الأخرى تماما بينما تتبقى معظم أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد والألومنيوم (شكل 15.6أ) . وعلى الرغم من أن هذه التربة تساعد الحياة النباتية المزدهرة فى الغابات الاستوائية ، إلا أنها تكون غير منتجة لنباتات المحاصيل بدرجة كبيرة . وتعاد دورة معظم المادة العضوية باستمرار من السطح إلى النباتات ، مع وجود طبقة رقيقة جدا من الدوبال على سطح التربة فى أحسن الأحوال . ويؤدى التخلص من الأشجار وحرث التربة إلى أكسدة الطبقة السطحية الغنية بالدوبال بسرعة واختفائها ، حيث تظهر الطبقة غير الخصبة التى تسفلها .



شكل (**15.6**): أنواع التربة الرئيسية :

(أ) قطاع تربة لاتيريت تكونت فوق صخر نارى مافى (مثل البازلت) فى منطقة مدارية .

(ب) قطاع تربة بيدوكال تكونت فوق صخر أساس رسوبى فى منطقة جافة (بها أمطار قليلة) .

(جـ) قطاع تربة بيدالفير تكونت فوق صخر أساس جرانيتى فى منطقة تكون فيها الأمطار متوسطة إلى غزيرة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ولهذا السبب ، فإن معظم اللاتيريت يزرع لعدة سنوات فقط ، بعد أن ينظف من الأشجار وقبل أن يصبح أرضا قاحلة يجب هجرها . وتوجد الآن مناطق شاسعة فى الهند فى هذه الحالة. ونظرا لأن أجزاء من غابات الأمازون الممطرة فى البرازيل قد أزيلت ، فإنها أصبحت أيضا قاحلة وغير خصبة بعد سنوات قليلة فقط ، حيث يلزم وقت طويل ، ربما يصل إلى آلاف السنين ، لكى يعاد تكوين غابة مرة أخرى على تربة اللاتيريت تحت الظروف الطبيعية .

2. المناخ الجاف :البيدوكال

إن التربة فى المناطق الجافة تكون رقيقة ، بسبب نقص المياه وغياب الغطاء النباتى ، مما يعوق التجوية. وفى المناطق الجافة الباردة ، حيث تكون التجوية الكيميائية بطيئة جدا، فإن تأثير الصخر الأصلى يكون هو العامل السائد ، حتى ولو تم تكوين التربة على مدى زمنى طويل . ونتيجة لذلك ، يحتوى النطاق-أ على الكثير من معادن وكسرات الصخر الأصلى التى لم يتم تجويتها. وعندما تكون الأمطار ضيئلة جدا لكى تذيب كميات معقولة من المعادن القابلة للذوبان ، فتبقى هذه المعادن فى نطاق- أ .

والبيدوكال **pedocal** هى التربة المنتشرة فى المناطق الجافة (شكل 15.6 ب) . وهى نوع من التربة يكون فقيرا فى المادة العضوية ، بينما يكون غنيا فى الكالسيوم الناتج من كربونات الكالسيوم ، بالإضافة إلى معادن أخرى قابلة للذوبان . وقد اشتق مصطلح البيدوكال من الكلمة اليونانية pedon بمعنى تربة ، بالإضافة إلى الحروف الثلاثة الأولى من كلمة calcite وهو معدن الكالسيت المكون من كربونات الكالسيوم . وتتواجد البيدوكال فى جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية ومايشبهها من المناطق . وفى مثل هذا المناخ وبين فترات سقوط الأمطار ، فإن الكثير من ماء التربة يسحب إلى قرب السطح ويتبخر ، تاركا عقيدات مترسبة وكرات صغيرة من كربونات الكالسيوم ، غالبا فى الطبقة الوسطى من التربة. وتربة البيدوكال لا تكون خصبة مثل تربة البيدالفير ، حيث إن التركيب المعدنى والجفاف لايسمحان بوجود نسبة عالية من الكائنات الحية فى التربة . وقد وجد علماء التربة أن الأتربة التى تحملها الرياح يمكن أن تساهم أيضا فى تراكم الأملاح فى تربة المناطق الجافة ، حيث كونت الكربونات طبقة صلبة غير منفذة فى قطاع التربة فى منطقة شاسعة جنوب غرب الولايات المتحدة ، تتكون من كربونات الكالسيوم البيضاء المعروفة **بالكاليش (قشرة كلسية) caliche**.

3. المناخ المعتدل :البيدالفير

تعتمد خصائص التربة فى المناطق المعتدلة فى سقوط الأمطار ودرجات الحرارة ، كما تعتمد أيضا على المناخ السائد وعلى نوعية الصخر الأصلى وطول المدة اللازمة لتكون التربة وزيادة سمكها . وتقلل التجوية الشديدة وكذلك مدة التعرض من تأثير الصخر الأصلى . لذلك فقد تختلف كثيرا التربة المتكونة فوق صخر أساس جرانيتى بعد وقت قصير وفى مناخ معتدل الحرارة والرطوبة عن التربة المتكونة على صخر حجر جيرى تحت نفس الظروف. فقد تظل تحتفظ التربة المتكونة فوق الجرانيت ببقايا من معادن السيليكات ، والتى يغلب عليها معادن الصلصال المتكونة من الفلسبار ، والتى تمثل المكون الرئيسى للصخر الأصلى. أما التربة المتكونة فوق الحجر الجيرى فقد تظل تحتفظ بقليل من بقايا كربونات الكالسيوم ، إلا أن معظم فتات الحجر الجيرى يذوب بسهولة . أما معادن الصلصال فإنها تمثل أساسا الشوائب الموجودة فى الحجر الجيرى الأصلى.

ومع ذلك ، فإن الفرق بين هاتين التربتين قد يتضاءل أو حتى يختفي بعد عديد من آلاف السنين . وقد تتكون هاتان التربتان من معادن الصلصال نفسها اعتمادا على طبيعة المناخ ، بعد أن فقد كلاهما كل المعادن القابلة للذوبان من الطبقات العليا.

وتسود تربة البيدالفير فى المناطق التى تكون فيها الأمطار من متوسطة إلى عالية فى شرق الولايات المتحدة الأمريكية ومعظم كندا وأوروبا . وقد اشتق اسم البيدالفير **pedalfer** من الكلمة اليونانية pedon وتعنى "تربة" و"al" و"fer" من الرمز الكيميائى للألومنيوم (Al) والحديد (Fe) . وتحتوى الطبقات العليا والمتوسطة من البيدالفير على وفرة من المعادن غير القابلة للذوبان مثل الكوارتز ومعادن الصلصال ونواتج تغير الحديد . أما معادن الكربونات والمعادن الأخرى القابلة للذوبان فإنها تختفى (شكل 15.6 ج) . وتعتبر البيدالفير تربة صالحة للزراعة.

وكما يتضح مما سبق أن تقسيم التربة يتم طبقا للخواص الفيزيائية والكيميائية بطريقة تشابه كثيرا الطريقة المستخدمة فى تقسيم الصخور. ويتم اعتمادا على هذه التصنيفات رسم الخرائط ودراسة وفهم توزيع التربة ، وكذلك العوامل التى ساعدت فى تكوينها مما يساعد على الاستخدام الأمثل لهذه التربة . وتصنف التربة الآن فى الولايات المتحدة الأمريكية طبقا لتصنيف قياسى إلى عشر مجموعات ، تحتوى كل مجموعة منها على أقسام يسهل تعرفها . ويلاحظ أن المصطلحات المستخدمة فى وصف أقسام التربة إلى لاتيريت وبيدالفير وبيدوكال ليست سهلة ، كما أن هذا التصنيف لا يأخذ فى الاعتبار الاختلافات فى صخور الأساس .

ج. التربة القديمة : كدليل على المناخ فى الأزمنة القديمة

لقد تزايد الاهتمام فى العصر الحاضر بالتربة القديمة ، والتى حفظت كصخور فى السجل الجيولوجى ، ويبلغ عمر بعضها بليون سنة . وتعرف التربة القديمة **paleosol** بأنها تربة تكونت عند سطح الأرض ثم دفنت وحفظت فيها بعد ، ويعتبر سطحها العلوى سطح عدم توافق unconformity أى انقطاع مؤقت فى الترسيب أو سطح تجوية . ويتم دراسة هذا النوع من التربة للاستدلال على المناخات القديمة ، أو لتحديد نسبة ثانى أكسيد الكربون والأكسيجين فى الغلاف الجوى فى الأزمنة القديمة. وتستنتج هذه الأدلة من التربة القديمة التى يبلغ عمرها ملايين السنين من خلال دراسة تركيبها المعدنى ، حيث يستدل على عدم وجود أكسدة للتربة فى هذه المرحلة المبكرة من تاريخ الأرض ، وبالتالى لم ينطلق الأكسيجين ليصبح جزءا رئيسيا من الغلاف الجوى خلال تلك المرحلة المبكرة من تاريخ الأرض . كما تستخدم التربة القديمة لتقسيم ومضاهاة التتابعات الرسوبية . كما تستخدم أيضا كأدلة لاستنتاج المعالم التضاريسية ونوع الغطاء النباتى .

VI الرواسب المعدنية المتكونة بالتجوية

قد تؤدى التجوية الكيميائية إلى تكوّن رواسب معدنية ذات قيمة اقتصادية نتيجة إزالة المعادن الذائبة وتركيز المعادن الأقل ذوبانا . وفيما يلى استعراض لبعض أهم تلك الرواسب الاقتصادية :

أ. الإثراء الثانوى

تعرف عمليات تجوية الراسب المعدنى كيميائيا والتى تؤدى إلى رفع نسبة المحتوى الفلزى فى جزء من الراسب نتيجة إزالة المعادن الذائبة وتركيز الفلزات الأكثر ذوباناً بالإثراء الثانوى **secondary**

enrichment . وقد تكونت بعض الرواسب الاقتصادية المهمة للحديد والمنجنيز والنيكل والنحاس فى العالم عن طريق الإثراء الثانوى.

رواسب اللاتيريت : اللاتيريت laterites هو مثال لتركيز المعادن بالتجوية . والمواد الأولية فى اللاتيريت هى الصخور العادية التى تحتوى على عناصر الحديد والألومنيوم التى يتم تركيزها فيها بعد . والليمونيت هو أحد المعادن قليلة الذوبان المتكونة خلال عملية التجوية الكيميائية. وفى المناخ الحار الممطر بغزارة (مناخ استوائى) يتم غسل معظم المعادن ببطء من التربة ، بحيث يتخلف عند السطح قشرة من الليمونيت الغنى بالحديد غير القابل للذوبان. وقد يكون اللاتيريت غنيًّا بالحديد لدرجة أنه يمكن استغلاله اقتصاديا ، مثل الموجود فى غرب إفريقيا .

رواسب البوكسيت: وقد تسبب تجوية السيليكات تكوّن مواد أخرى غير معادن الطين ، مثل **البوكسيت bauxite** وهو خام متكوّن من أكاسيد الألومنيوم المائية . وهو أحد الخامات المهمة لفلز الألومنيوم . ويتكون البوكسيت عندما تذاب كل السيليكا (SiO_2) والأيونات الأخرى عدا الألومنيوم الناتجة عن تجوية كل معادن الصلصال الناتجة عن تجوية السيليكات . ويتواجد البوكسيت فى المناطق الاستوائية ، حيث يكون المطر غزيرا ودرجة الحرارة عالية والتجوية شديدة .

ب. تركيز الماس

الماس أكثر معدن معروف على الأرض من حيث الصلادة ، وهو أيضاً معدن مقاوم للتجوية للغاية. وترجع صلادته الشديدة إلى الرابطة التساهمية القوية التى تربط ذرات الكربون ، كما أوضحنا فى الفصل الثانى . ويتواجد الماس عند سطح الأرض فى أنابيب الماس diamond pipes، وهى أعمدة من صخر فوقمافى متكسر ، صعدت من الوشاح العلوى للأرض، تحتوى على بلورات الماس الموزعة بعيدا عن بعضها البعض . وعندما تحدث التجوية المتفاوتة للصخور فوقالمافية عند سطح الأرض ويتم تعريتها ، ونظرا لمقاومة بلورات الماس للتجوية ، فإنها تبقى ويتم تركيزها فى رواسب غنية بالماس عند قمة تلك الأنابيب . وقد تعيد الأنهار توزيع وتركيز الماس ، كما هو الحال فى جنوب إفريقيا. وفى كندا ، فإن أنابيب الماس يتم تعريتها بالمثالج حيث يتواجد الماس مبعثرا فى رواسب تلك المثالج .

VII. الإنسان كعامل من عوامل التجوية

يعتبر الإنسان جزءا من البيئة . فالإنسان هو المسئول عن الأمطار الحمضية ، والتى تنشط عملية التجوية الكيميائية للآثار القديمة بطريقة ملحوظة ، كما تعمل على تجوية المنكشفات الصخرية أيضا ولكن بطريقة غير محسوسة . وحيث إن التجوية الفيزيائية تساعد التجوية الكيميائية ، فإن دور الإنسان يدخل كعنصر مساعد لكلتا العمليتين من خلال عديد من النشاطات التى تؤدى إلى تكسر الصخور أثناء حفر الأساسات وإنشاء الطرق السريعة وعمليات حفر المناجم . ولقد قدر أن نشاط إنشاء الطرق وحده فى العالم يسبب تحريك 3000 تريليون طن من الصخور والتربة كل عام .

وقد أظهرت البحوث الحديثة أن التربة يمكن أن تكون مصدرا دائما للتلوث نتيجة اختلاطها بالمواد السامة والتى تؤدى إلى تلوث التربة. وترشح هذه الملوثات ببطء من التربة إلى الأرض والمياه السطحية . كما أضاف الإنسان إلى الأرض أيضا الأملاح والمبيدات ومنتجات البترول ، والتى تؤثر على نمو النباتات ، فتترك التربة عرضة للتأثر السريع بالتعرية. وبذلك يتضح أن الإنسان قد أثر بدرجة ملحوظة على سطح الأرض خلال آلاف السنين من حضارته البشرية ، ولاسيما فى القرنين الأخيرين .

الملخص

1. تتهدم الصخور عند سطح الأرض بسبب التجوية الكيميائية والفيزيائية . وتحمل نواتج التعرية بعيدا ، حيث تمثل المادة الخام لرواسب جديدة .
2. تمتد التجوية إلى أى عمق فى القشرة الأرضية يمكن أن يتخلله الماء والهواء ، حيث تتخلل المحاليل المائية عبر الفواصل والشقوق فى الصخر الأصلى فتؤدى إلى تحللها . وتعمل التجوية الكيميائية والطبيعية معا رغم أن كلا منهما يعمل بطريقة مختلفة تماما .
3. التجوية والتعرية عمليتان مكملتان لدورة الصخور. وتتواجد المعادن الأقل مقاومة للتجوية مدفونة فى بيئات القشرة الأرضية ، وهى تختلف عن المعادن الموجودة على سطح الأرض .
4. تؤثر طبيعة الصخر الأصلى والتراكيب الموجودة به على عملية التجوية لأن المعادن المختلفة المكوّنة للصخور يتم تجويتها بسرعات مختلفة . ويؤثر المناخ على التجوية ، فالمناخ الدافئ والأمطار الغزيرة يزيد من سرعتها ، بينما يبطئ المناخ البارد الجاف من سرعتها . كما ينشط التجوية الكيميائية وجود التربة حيث الرطوبة والبيئة الحامضية ، بينما تعمل جذور النباتات على تنشيط التجوية الطبيعية . وكلما زادت فترة تعرض الصخر للتجوية ، تجوى أكثر ، وذلك عند تساوى كل عوامل التجوية.
5. تشمل التجوية الكيميائية عمليات تحول المعادن التى تكونت عند درجات حرارة عالية وضغط مرتفع إلى معادن أخرى تكون مستقرة عند سطح الأرض . وأهم العمليات التى تحدث فى التجوية الكيميائية التحلل المائى والغسل والأكسدة والتميؤ والإذابة.
6. يساعد ثانى أكسيد الكربون الموجود فى الماء على تنشيط التجوية الكيميائية ، حيث يتكون حامض الكربونيك . وتتم تجوية الفلسبار البوتاسى ($KAlSi_3O_8$) فى وجود هذا الحمض، حيث يذوب البوتاسيوم (K) والسيليكا (SiO_2) فى محلول الماء ويتحول الفلسبار إلى معدن صلصال مكوّنا الكاولينيت $Al_2Si_2O_5[OH]_4$. ويحمل الماء الأيونات الذائبة والسيليكا فى الأرض، أو بواسطة المجارى المائية فوق سطح الأرض . ويتم تجوية الحديد (Fe) الموجود كأكسيد حديدوز فى عديد من السيليكات بالأكسدة ، لتتكون أكاسيد الحديديك . وتذوب الكربونات أثناء عملية التجوية، ولا يترك بعدها أى راسب متبقٍ. وتحدث هذه العمليات عند سرعات مختلفة ، لتعكس درجات الثبات الكيميائى للمعادن تحت ظروف التجوية .
7. تؤدى التجوية الطبيعية إلى تكسر الصخور إلى فتات، حيث توجد الكسور إما على امتداد حدود البلورات وإما على امتداد الفواصل فى كتل الصخور ، وذلك بدعم من التجوية الكيميائية . كما تحدث التجوية الطبيعية أيضا بسبب التوتد الصقيعى وتبلور المعادن والحفر والأنفاق التى تحفرها الكائنات الحية وجذور النباتات وتعاقب الحرارة والبرودة ، حيث تعمل جميعا على توسعة الكسور والشقوق ؛ مما يؤدى إلى وجود نقاط ضعف عند الحدود الفاصلة بين الحبيبات.
8. تنتج أنماط تجوية مختلفة مثل التقشر والتجوية الكروية من تداخل وتفاعل العمليات الطبيعية والكيميائية.
9. تتكون التربة من خليط من معادن الصلصال وجزئيات الصخور التى تم تجويتها وبعض المواد العضوية ، بالإضافة للمسام التى يتخللها الماء والهواء . وتتكون التربة نتيجة تفاعل الكائنات الحية

مع الصخور التى تم تجويتها والماء. وحيث إن المناخ ونشاط الكائنات الحية يتحكم فى التجوية ، فإن التربة تتكون أسرع فى المناخات الدافئة الرطبة عن المناخات الباردة الجافة.

10. تعكس التربة الحديثة تركيب الصخر الأصلى ، بينما تعكس التربة القديمة أساسا المناخ السائد وقت تكوّنها ، كما يمكن أن تقدم التربة القديمة دليلا على المعالم الأرضية السابقة والغطاء النباتى ، كما تساعد فى عمل تقسيمات ومضاهاة التتابعات الصخرية التى تحتويها .

11. الأنواع الثلاثة الرئيسية للتربة هى : اللاتيريت وتوجد فى المناخات الاستوائية الرطبة ، والبيدوكال (تربة كلسية) وتتكون فى المناخات الدافئة الجافة ، والبيدالفير (تربة غنية بالحديد والألومنيوم) وتتكون فى المناخات المعتدلة.

12. يشمل قطاع التربة ثلاثة نطاقات أ و ب و ج . ويكون النطاق أ غنى بالمادة العضوية ، ويفقد المعادن الذائبة بالغسيل ، ويتراكم الصلصال فى نطاق ب مع المواد التى تم غسلها من نطاق- أ ، ويعلو النطاقان - أ و- ب نطاق - ج الذى يتكون من صخر الأساس الذى تم تجويته قليلا .

13. تؤدى التجوية الكيميائية إلى تركيز الرواسب المعدنية المهمة اقتصاديا ، والتى تكون مصادر أولية لمعادن الألومنيوم والنيكل والحديد والمنجنيز والنحاس .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.uoguelph.ca/~sadura/wearef/weares.htm

http://www.prenhall.com/tarbuck

http://www.mhhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhtml

المصطلحات المهمة

A horizon	نطاق- أ	kaolinite	كاولينيت
alteration	تغيير	laterite	لاتيريت
B horizon	نطاق- ب	leaching	غسل
bauxite	بوكسيت	mechanical weathering	تجوية ميكانيكية
bedrock	صخر الأساس	oxidation	أكسدة
boulder fields	حقول الجلاميد	mushroom rocks	صخور عيش الغراب أو موائد الشيطان
C horizon	نطاق- ج	paleosol	تربة قديمة
caliche	كاليش (قشرة كلسية)	pedalfer	بيدالفير
carbonic acid	حمض الكربونيك	pedocal	بيدوكال
chemical weathering	تجوية كيميائية	pedology	علم التربة
dehydration	نزع (إزالة) الماء	physical weathering	تجوية طبيعية (فيزيائية)
differential weathering	تجوية متفاوتة (متباينة)	regolith	حطام صخرى (أديم)
dissolution	ذوبان (إذابة)	residual soil	تربة متبقية
erosion	تعرية	rubble	دبش (إثلب)
exfoliation	تقشر	secondary enrichment	إثراء ثانوى
frost wedging	توتد صقيعى	soil	تربة
goethite	جوثيت	soil profile	قطاع التربة
hematite	هيماتيت	solubility (mineral)	قابلية الذوبان (المعدن)
hydration	تميؤ	spheroidal weathering	تجوية كروية
hydrolysis	تحلل مائى	talus	ركام
humus	دوبال	transported soil	تربة منقولة
joint	فاصل	weathering rind	لحاء تجوية

الأسئلة

1. ما المعادن التى توجد فى الصخور النارية والتى يتم تحويلها إلى معادن الصلصال؟
2. كيف تؤثر مياه الأمطار الغزيرة على التجوية ؟
3. ما الذى يتجوى أسرع الجرانيت أم الحجر الجيرى ؟
4. ما أوجه الاختلاف بين التجوية الطبيعية والتجوية الكيميائية ؟
5. كيف تؤثر المناخات على التجوية الكيميائية ؟
6. منكشفان لصخرى الجرانيت والبازلت فى منطقة حارة رطبة . اذكر نوع التجوية التى يمكن أن تسود فى تلك المنطقة ، وأى الصخرين يتم تجويته بمعدل أسرع ؟ ولماذا ؟
7. اذكر الطريقة التى تؤثر بها الفواصل على تجوية الصخور .
8. لماذا يكون التوتد الصقيعى أكثر تأثيرا عند درجة الحرارة بين نحو – 5°م و – 15°م ؟
9. وضح لماذا تتركز بعض المعادن مثل الذهب والبلاتين فى الرواسب .
10. اذكر العوامل الأساسية التى تتحكم فى الأنواع المختلفة من التربة .
11. ما الفرق بين الغطاء الصخرى والتربة ؟
12. تحتوى التربة فى كل من المنطقة الاستوائية الرطبة والمنطقة القطبية على القليل من المادة العضوية . هل يرجع نقص الدوبال فى المنطقتين إلى الأسباب نفسها ؟
13. ماذا نستنتج عن المناخ الذى تكونت فيه تربة مدفونة تحتوى على كاليش عند قمة النطاق- ج ؟
14. لماذا تعتبر قمة التربة القديمة سطحا لعدم التوافق ؟
15. صف نطاقات قطاع تربة جيدة التكوين فى غابات دائمة الخضرة ، وأيضا فى منطقة جافة .

الفصل 7

الرواسب والصخور الرسوبية

I. الصخور الرسوبية ومراحل تكونها :

أ. التجوية والتعرية

1 . الرواسب الفتاتية

2 . الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية

ب. النقل والترسيب: رحلة إلى مواقع الترسيب :

1. التيارات كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية

2. المثالج كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية

3. السوائل: كوسائل لنقل المواد المذابة

4. المحيطات : خزانات ضخمة للخلط الكيميائى

ج. الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب: التحول من راسب إلى صخر رسوبى :

1. الدفن نتيجة تراكم الرواسب

2. تغيرات مابعد الترسيب: تحول الراسب إلى صخر بالحرارة والضغط والتغيرات الكيميائية

II. الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية :

أ. شكل الحبيبة

ب. الفرز

ج. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية :

1. الفتاتيات خشنة التحبب : الجرول والكونجلومرات

2. الفتاتيات متوسطة التحبب: الرمل والحجر الرملى

3. الفتاتيات دقيقة التحبب:الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطينى والطفل

III. الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية :

أ. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية :

1. الرواسب والصخور الرسوبية الكربوناتية : الحجر الجيرى وحجر الدولوميت
2. الرواسب والصخور الرسوبية التبخرية
3. الرواسب السيليكية: مصدر للتشرت
4. تكوين الرواسب بعمليات ما بعد الترسيب: فوسفوريت
5. رواسب أكسيد الحديد: مصدر لمتكوّن الحديد
6. المادة العضوية مصدر للفحم والنفط والغاز

IV. التراكيب الرسوبية :

أ. التطبق

ب. التطبق المتقاطع

ج. التطبق المتدرج

د. علامات النيم

هـ. تراكيب التقليب الحيوى (الاضطراب الحيوى)

و. تشققات الطين

ز. التتابعات الطبقية

V. بيئات الترسيب والسحنات الرسوبية :

أ. البيئات القارية

ب. بيئات خط الشاطئ

ج. البيئات البحرية

د. السحنات الرسوبية : تواجد مجموعة من البيئات الرسوبية مع بعضها بعضا

VI. الترسيب وتكتونية الألواح

تغطي الرواسب **sediments** والصخور الرسوبية **sedimentary rocks** ما يزيد على 75 ٪ من سطح القشرة الأرضية . وهي توجد على هيئة طبقات تكونت من حبيبات مفككة من الحطام الصخرى (الأديم) regolith ، أو من مواد مذابة نشأت نتيجة تجوية الصخور القارية ثم تم ترسيبها . وتعتبر الرواسب وكذلك الصخور الرسوبية التى نشأت منها سجلا للظروف التى كانت سائدة وقت ترسيبها ، ولذلك فإنها تستخدم فى استنتاج البيئات القديمة والظروف التى كانت سائدة وقت تكوينها ، اعتمادا على محتواها المعدنى والحفرى وأنسجتها والتراكيب التى توجد بها ، بالإضافة إلى أماكن الترسيب على سطح الأرض.

فمثلاً يحتوى جبل المقطم فى شرق القاهرة بمصر على طبقات من الحجر الجيرى تتبع حين الإيوسين توجد بها حفريات لكائنات بحرية . ويمكن باستخدام هذه الملاحظات استنتاج أن هذه المنطقة التى ترتفع الآن 160 مترا عن سطح القاهرة كانت قاعا لمحيط فى يوم من الأيام . ويمكن باستخدام حتى حبيبة واحدة من معدن البيروكسين فى رواسب نهر النيل استنتاج الكثير من المعلومات ؛ فقد تكون هذه الحبيبة أصلاً عبارة عن بلورة فى صخر بازلت بمنطقة منابع النيل فى هضبة البحيرات الاستوائية والمرتفعات الأثيوبية ، ثم انفصلت عن بقية المعادن نتيجة تجوية البازلت ، ثم حملها الماء فى مجرى نهر النيل إلى المكان الذى استقرت فيه نهائيا ، حيث انضمت إلى بقية الحبيبات من المصدر نفسه أو من مصادر أخرى لتكوّن طبقة من رواسب الدلتا فى مصر.

ويمكن أيضا باستخدام طرق التحليل السابقة استنتاج بيئات الترسيب القديمة مثل خطوط الشواطئ والجبال والسهول والصحارى والمستنقعات . وعند إعادة تصور هذه البيئات، فإنه يمكن رسم خرائط تبين توزيع القارات والمحيطات التى كانت موجودة فى أزمنة سابقة .

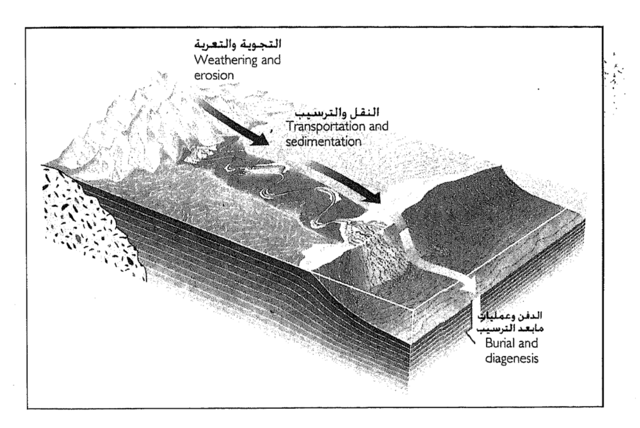
وتستخدم الصخور الرسوبية أيضا فى الوصول إلى استنتاجات أخرى ، مثل تكتونية وحركة الألواح السابقة ، وذلك باستخدام أدلة من الصخور الرسوبية الفتاتية التى تعكس نشأة تلك الصخور فى الأقواس البركانية أو وديان الخسف أو الجبال التى تكونت نتيجة تصادم الألواح . وحيث إن مكونات معظم الرواسب والصخور الرسوبية قد نشأت نتيجة تجوية صخور سابقة ، فيمكن استخدامها فى استنتاج المناخ القديم وطبيعة عمليات التجوية القديمة ، كما يمكن أيضا استنتاج تاريخ المحيطات بدراسة الرواسب البحرية .

وتهتم كثير من الدراسات البيئية بالعمليات الرسوبية ؛ لأنها تمدنا بالمعلومات الأساسية لفهم البيئة، حيث إن كل العمليات الرسوبية تحدث على سطح الأرض حيث يعيش الإنسان ، لذلك فهى مهمة لفهم المشاكل البيئية التى تحدث حولنا . وعلى الرغم من أن دراسة الصخور الرسوبية قد بدأت منذ مئات السنين ، إلا أن الدراسات البيئية لم يبدأ الاهتمام بها إلا منذ بداية عام 1960 م .

وترجع أهمية دراسة الرواسب والصخور الرسوبية بالإضافة إلى ما سبق إلى قيمتها الاقتصادية الكبيرة . فتحتوى هذه الصخور على النفط والغاز والفحم

ومعظم مصادر الطاقة ذات القيمة مثل اليورانيوم الذى يستخدم فى الطاقة النووية. كما أن صخور الفوسفات المستخدمة فى التسميد هى صخور رسوبية مثلها مثل كثير من خامات الحديد فى العالم ذات الأصل الرسوبى. ويساعد التعرف على كيفية تكوّن هذه الأنواع من الصخور فى استكشاف مصادر اقتصادية إضافية أكثر أهمية.

وسنناقش فى هذا الفصل العمليات الجيولوجية التى تؤدى إلى تكوين الرواسب والصخور الرسوبية، وكيفية استخدام تلك الخواص فى تعرف أنواع البيئات التى ترسبت فيها. كما سيتضح كيف يعتمد تفسير أصل الرواسب والصخور الرسوبية على مبدأ الوتيرة الواحدة uniformitarianism، والذى ينص على أن "الحاضر مفتاح الماضى"، أى يمكن تفسير الأحداث الجيولوجية التى وقعت فى الماضى من دراسة الظواهر والأحداث التى تقع فى الحاضر. كما سنناقش فى هذا الفصل أيضا العلاقة بين عمليات الترسيب وتكتونية الألواح.



شكل (1.7): المراحل الرسوبية لدورة الصخور والتى تشمل عددًا من العمليات المتداخلة وهى: التجوية الطبيعية والتجوية الكيميائية والتعرية والنقل والترسيب والدفن؛ حيث ينقل الراسب من الجبال إلى البحر ويعمل الدفن على تحويل الرواسب إلى صخور بعمليات مابعد الترسيب diagenesis، وتتكون على مسار انتقال الراسب من الجبال إلى البحر العديد من بيئات الترسيب.
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

مثل التجوية والنقل والترسيب وتغيرات ما بعد الترسيب (التخلق). كما سنوضح التركيب المعدنى والأنسجة وتراكيب الرواسب والصخور الرسوبية،

1. الصخور الرسوبية ومراحل تكوّنها

تمثل الرواسب والصخور الرسوبية التى تتكون منها عناصر مهمة فى دورة الصخور. وتقع الصخور

الرسوبية فى الجزء السطحى من هذه الدورة ، بين الصخور النارية التى تخرج من الأعماق نتيجة الحركات التكتونية ، والصخور التى تعود إلى أعماق الأرض لتكوّن الصخور المتحولة . ويوضح شكل(1.7) العمليات العديدة المتداخلة التى تمثل مراحل تكوّن الصخور الرسوبية فى دورة الصخور ، وهى التجوية والتعرية والنقل والترسيب والدفن وتغيرات ما بعد الترسيب ، وهى التغيرات الطبيعية (الضغط ودرجة الحرارة) والكيميائية (التفاعلات الكيميائية) التى تتعرض لها الرواسب المدفونة فتتحول إلى الصخور الرسوبية .

أ – التجوية والتعرية

تؤدى التجوية الميكانيكية والكيميائية للصخور على سطح الأرض إلى تكوّن المواد الصلبة الفتاتية والذائبة ، ثم تقوم عملية التعرية بحملها بعيدا. وينتج عن هذه العمليات ثلاثة أنواع مختلفة من الرواسب هى: الرواسب الفتاتية والرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية . ونعرض فيما يلى وصفا لكل من هذه الأنواع :

1 – الرواسب الفتاتية

الرواسب الفتاتية clastic sediments (وتعرف أيضا بالرواسب الحتاتية detrital sediments) عبارة عن فتات صلب نتج عن تجوية صخور سابقة ثم نقل بعوامل طبيعية مثل الهواء أو مياه الأنهار أو المثالج . ويختلف هذا الفتات فى الحجم بين جلاميد وحصى وحبيبات رمل وغرين وصلصال ، كما يختلف فى الشكل أيضاً . وتتحدد أشكال الجلاميد والحصى بالكسور الطبيعية التى تتكون على امتداد الفواصل ومستويات التطبق فى الصخر الأصلى ، بينما تستمد حبيبات الرمل أشكالها من أشكال البلورات المفككة ، التى كانت متداخلة من قبل فى الصخر الأصلى .

والرواسب الفتاتية عبارة عن تراكمات من مواد فتاتية ، تحتوى غالبا على معادن سيليكاتية . ويختلف تركيب خليط المعادن المكوّن للراسب الفتاتى ، حيث يحتوى على معدن الكوارتز ذى المقاومة العالية ، بالإضافة إلى بعض المعادن الأقل ثباتا ، والتى تجوت جزئياً مثل الفلسبارات والمعادن الأخرى حديثة التكوين مثل معادن الصلصال . كما يؤدى تغير شدة التجوية إلى تكوّن مجموعات مختلفة من المعادن المستمدة من الصخر الأصلى. فعندما تكون التجوية شديدة فإن الراسب يحتوى فقط على حبيبات فتاتية مكوّنة من معادن ثابتة كيميائياً مختلطة مع معادن الصلصال . وعندما تكون التجوية ضعيفة ، فإن عديدًا من المعادن غير الثابتة تحت الظروف السطحية تبقى وتتواجد فى الراسب كحبيبات فتاتية . ويبين جدول (1.7) ثلاث مجموعات مختلفة من المعادن التى يمكن أن تنتج عن تجوية صخر الجرانيت تحت ظروف تجوية مختلفة الشدة.

وفى العادة ، فإن الرواسب الفتاتية تتكون بمعدل أكبر بكثير من الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية . كما تتهشم الصخور نتيجة للتجوية الطبيعية بمعدل أكبر من إذابتها بالتجوية الكيميائية . ولذلك ، فإن الرواسب الفتاتية تمثل تقريبا عشرة أضعاف الرواسب الكيمائية والرواسب الكيميائية الحيوية فى القشرة الأرضية .

جدول (1.7) مجموعات المعادن المكوّنة لرواسب فتاتية ، وتكونت نتيجة تجوية صخر الجرانيت تحت ظروف تجوية مختلفة الشدة

	شدة التجوية		
	منخفضة	متوسطة	عالية
المعادن المتبقية فى الراسب	كوارتز فلسبار ميكا بيروكسين أمفيبول	كوارتز فلسبار ميكا معادن صلصال	كوارتز معادن صلصال

2 . الرواسب الكيميائية والرواسب الكيميائية الحيوية

تكون نواتج التجوية الكيميائية فى معظم الأحيان عبارة عن أيونات أو جزيئات مذابة فى ماء التربة أو الأنهار والبحيرات والمحيطات . وتترسب هذه المواد المذابة من الماء نتيجة التفاعلات الكيميائية والكيميائية الحيوية ، حيث تتكوّن **الرواسب الكيميائية chemical sediments** . ويتكوّن الراسب الكيميائى نتيجة تفاعلات غير عضوية فى الماء . فعندما يبرد الماء الساخن الخارج من ينبوع spring فقد يترسب أوبال (ثانى أكسيد سيليكون) أو كالسيت (كربونات كالسيوم) . وهناك مثال آخر شائع وهو التبخر البسيط لماء البحر أو ماء البحيرات. فعندما يتبخر الماء ، فإن المادة المذابة تتركز وتبدأ الأملاح فى الترسب على هيئة طبقات يكون أكثرها شيوعا تلك المكوّنة من الجبس أو الهاليت.

كما تتكون **الرواسب الكيمائية الحيوية biochemical sediments** من المعادن المتبقية من الكائنات الحية ، بالإضافة إلى المعادن المتكونة نتيجة للتفاعلات الكيميائية الحيوية للنباتات والحيوانات التى تعيش فى الماء . فمثلاً ، تستطيع بعض النباتات التى تعيش فى البحار أن تقلل من حموضة الماء حولها ، مما يؤدى إلى ترسيب بيكربونات الكالسيوم الذائبة فى الماء فى شكل كربونات الكالسيوم . كما يتكون الحديد أيضا نتيجة لنشاط بعض الكائنات الحية . ويحتوى عديد من طبقات الرواسب الكيميائية الحيوية على حبيبات رسوبية ذات أصل عضوى ، مثل: المراجين والطحالب والأصداف الكاملة أو بعض أجزائها ، حيث تختلف أحجام تلك الحبيبات كثيرا . وتعمل الأمواج والتيارات أثناء عملية النقل على قاع البحر على استدارة الحواف الحادة لتلك الحبيبات ، كما قد تتجمع تلك الحبيبات وتترسب حسب حجمها لتكوّن طبقات من **حبيبات فتاتية حيوية bioclastic particles** ، يغلب على تركيبها مادة كربونات الكالسيوم فى صورة معدن الكالسيت أو الأراجونيت . كما قد تتكون رواسب كربونات الكالسيوم أيضا فى أعماق البحار من أصداف أنواع قليلة من الكائنات الحية ، ومعها القليل من الحبيبات الفتاتية الحيوية ، وتكون فى هذه الحالة مكوّنة فقط من كربونات الكالسيوم فى صورة معدن الكالسيت. أما فى المناطق الضحلة من البحار ، فإن الرواسب تتكون من كربونات الكالسيوم ، فى صورتى الكالسيت أو الأراجونيت .

ب – النقل والترسيب: رحلة إلى مواقع الترسيب

تُنقَل المواد الفتاتية والأيونات المذابة نتيجة التجوية، وأيضا المواد المتكونة كيميائيا أو كيميائيا حيويا إلى مناطق الترسيب ، والتى تكون قريبة عادة . وتقوم عوامل النقل المختلفة بنقل المواد على المنحدرات تحت

تأثير قوة الجاذبية الأرضية . فالصخور الساقطة من الجرف ، والرمال المحمولة بواسطة الأنهار وتجرى نحو البحر ، وجليد المثالج الذى يجرف فتات الصخور ببطء على المنحدرات تكون كلها استجابة للجاذبية الأرضية. وعلى الرغم من أن الرياح ربما تذرو المواد من الصخور المنخفضة إلى المرتفعات ، فإن الجاذبية على المدى البعيد هى العامل الأكثر تأثيرا ، فالرمال والأتربة تترسب استجابة لتأثير الجاذبية الأرضية . وبمجرد أن تسقط الحبيبات إلى المحيط وتترسب خلال الماء ، فعندها تكون كما لو كانت دخلت فى شرك أو فخ . ويمكن أن تنقل هذه الرواسب مرة أخرى إلى موقع ترسيب جديد على قاع المحيط .

1. التيارات كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية

تُنقَل معظم الرواسب الفتاتية بواسطة تيارات الماء أو الهواء . وتعمل تيارات الماء فى الأنهار على نقل كميات هائلة من الرواسب إلى المحيطات ، والتى تصل سنويا إلى نحو 25 بليون طن من الرواسب الصلبة والذائبة . كما تحمل تيارات الهواء المواد أيضا ، ولكن بكميات أقل بكثير من تيارات الأنهار والمحيطات . وبمجرد أن تترك الحبيبات فى الهواء أو الماء ، فإن التيار يحملها عبر الأنهار أو بالرياح . وكلما كان التيار أقوى – بمعنى أنه أسرع انسيابا – كان حجم الحبيبات المنقولة أكبر .

وتبدأ عملية الترسيب sedimentation للمواد الفتاتية بعد توقف عملية نقل الرواسب. وتلعب الجاذبية الأرضية الدور الحاسم عند ترسيب المواد الفتاتية . وعلى الرغم من أن كل الحبيبات تسقط على الأرض بنفس السرعة بصرف النظر عن حجمها حسب قوانين الفيزياء ، إلا أن الحبيبات الكبيرة تترسب بمعدل أسرع من الحبيبات الصغيرة ، حيث تتناسب سرعة الترسيب طرديا مع كثافة الحبيبة وحجمها . وحيث إن معظم المعادن الشائعة فى الرواسب يكون لها تقريبا نفس الكثافة (نحو 2.6 إلى 2.9 جم/ سم^3) ، فإننا نستخدم الحجم والذى يسهل قياسه ، كمقياس لسرعة ترسيب المعادن المكوّنة للرواسب .

فعندما تقل سرعة التيار الحامل للمواد الفتاتية مختلفة الأحجام ، تبدأ الحبيبات الأكبر حجما فى الترسب ، ويتوالى ترسيب المواد الأقل حجما كلما قلت سرعة التيار. وتعرف عملية تجميع الرواسب فى مجموعات طبقا لحجمها ، بحيث تتشابه حبيبات كل مجموعة منها فى الحجم ، بعملية الفرز sorting . وسنناقش عملية الفرز لاحقًا عند شرح الرواسب الفتاتية .

2. المثالج كعوامل لنقل الحبيبات الفتاتية

تحمل المثالج glaciers أيضاً الحبيبات الفتاتية . وعندما تتحرك أنهار الجليد على المنحدرات نحو سفوح التلال نتيجة الجاذبية الأرضية ، فإنها تجرف معها كميات كبيرة من الفتات الصخرى والحبيبات الصلبة التى تم تعريتها من التربة وصخر الأساس bedrock ، وتكوّن تلك الحبيبات خليطا غير متجانس الحجم (ردىء الفرز) ، حيث إنها لا يمكن أن تترسب وتفرز فى وسط الجليد الصلب . ولكن عندما تذوب المثلجة ، فإنها ترسب كمية كبيرة من الحطام والحبيبات الفتاتية ، والتى تتدرج فى الحجم من الحصى إلى الصلصال عند حافة الجليد المنصهر. وتحمل أنهار الماء المنصهر الحطام بعيدا ويصبح عرضة لعملية الفرز التى تطبق على الحبيبات الفتاتية الأخرى .

ويسبب النقل بالمثالج ضغط الحبيبات مع بعضها البعض ببطء واصطدامها وتكسرها، مما يؤدى إلى أن تصبح الحبيبات أصغر حجما ولكنها ليست مستديرة . كما تسبب المثالج تفتت صخر الأساس عند قاع وحواف المثلجة .

3. السوائل: كوسائل لنقل المواد المذابة

تلعب التفاعلات الكيميائية دورا أكبر من الدور الذى تلعبه الجاذبية الأرضية فى عمليات النقل والترسيب الكيميائى والكيميائى الحيوى . ويتم نقل المواد الكيميائية الذائبة بالتجوية مع الماء الحاوى لها فى شكل محلول متجانس ، حيث تكون المواد الذائبة (مثل أيونات الكالسيوم) جزءا من محلول الماء نفسه ، الذى ينساب عبر الأنهار إلى البحيرات والمحيطات .

4. المحيطات : خزانات ضخمة للخلط الكيميائى

يعتبر المحيط خزانا ضخما للخلط الكيميائى ، حيث تحمل الأنهار والأمطار والرياح والمثالج المواد المذابة إلى المحيط باستمرار . كما تدخل المحيط أيضا كميات صغيرة من المواد المذابة نتيجة التفاعلات الكيميائية الحرمائية بين مياه البحر والبازلت الساخن فى حيود وسط المحيط . وتقوم التيارات والأمواج بخلط هذه المواد مع مياه المحيط . ويتبخر ماء المحيط باستمرار عند السطح . وتعادل كمية المياه التى تنساب إلى المحيط تلك التى يفقدها خلال عملية التبخير ، بحيث تبقى كمية المياه فى المحيطات ثابتة خلال الفترات الجيولوجية القصيرة مثل السنوات والعقود أو حتى القرون ، بينما قد يتغير هذا التوازن خلال الفترات الزمنية الأطول كملايين السنين . كما يتوازن دخول وخروج المواد المذابة أيضا . وتشارك كل المواد الذائبة فى ماء البحر فى التفاعلات الكيميائية والكيميائية الحيوية ، والتى تؤدى إلى ترسبها على قاع البحر ؛ فقد تترسب كميات صغيرة من المواد الكيميائية المنقولة بالمجارى المائية فى البحيرات المالحة أو البحيرات القلوية ، بينما تترسب كميات ضخمة فى البحار المالحة المجاورة ، وهى بيئة مختلفة تماما عن بيئة المياه العذبة فى الأنهار. ويترتب على ترسيب المواد الذائبة فى مياه المحيطات فى صورة رواسب كيميائية أو كيميائية حيوية ، أن تبقى ملوحة salinity المحيطات ثابتة ، أى تبقى الكمية الكلية للمواد المذابة فى حجم معين من ماء البحر ثابتة . وتتعادل بذلك كمية المواد المترسبة على قيعان المحيطات مع كمية المواد الذائبة التى تنساب إليها نتيجة تجوية صخور القارات وكذلك النشاط الحرمائى عند حيود وسط المحيط .

ويمكن تعرف بعض العمليات التى تحافظ على هذا الاتزان الكيميائى فى المحيطات من متابعة عنصر الكالسيوم ، الذى يعتبر المكون الأساسى لمادة كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) التى تكوّن معظم الرواسب الكيميائية الحيوية المنتشرة فى المحيطات . ويذاب الكالسيوم عندما تتعرض صخور الحجر الجيرى ومعادن السيليكات التى تحتوى على الكالسيوم (مثل الفلسبارات والبيروكسينات) للتجوية على سطح الأرض ، حيث يُنقَل الكالسيوم كأيونات كالسيوم (Ca^{2+}) إلى المحيطات . وتقوم الكائنات الحية البحرية بالعمل على اتحاد أيونات الكالسيوم مع أيونات البيكربونات (HCO_3^-) الذائبة فى مياه البحار لتكوّن أصدافها . وحينما تموت الكائنات الحية وتستقر أصدافها وتتراكم على هيئة رواسب مكوّنة من كربونات الكالسيوم على قاع المحيط ، فإنها تتحول نهائيا عند تعرضها لعمليات ما بعد الترسيب إلى الحجر الجيرى ، وبذلك يترك الكالسيوم مياه المحيط الذى دخله كأيونات ذائبة . وهكذا تلعب الكائنات الحية دورا مهما فى المحافظة على ثبات نسبة الكالسيوم المذاب فى المحيط .

وتساعد العمليات غير العضوية أيضا على التوازن الكيميائى فى مياه المحيطات . حيث تتفاعل أيونات الصوديوم (Na^+) المنقولة إلى المحيطات مع أيونات الكلوريد (Cl^-) ليترسب كلوريد الصوديوم (NaCl) فى صورة معدن الهاليت ، حينما يعمل البخر على زيادة

نسبة أيونات الصوديوم والكلوريد فى الماء لتصل إلى درجة فوق التشبع . وكما أوضحنا فى الفصل الثانى، فإن المعادن تتبلور من المحاليل فوق المشبعة عندما يحتوى المحلول على كمية كبيرة من المادة المذابة والتى تتفاعل تلقائيا لتكوّن الرواسب . ويحدث البخر الشديد اللازم لحدوث التبلور فى المياه الدافئة ، والتى توجد فى أذرع البحار الضحلة .

والترسيب العضوى هو نوع آخر من الترسيب الكيميائى الحيوى . فعندما تُحفَظ النباتات من التحلل بعد أن تتراكم فى المستنقعات كمادة غنية بالمادة العضوية فإنها تكوّن الخُث (بيت) **peat** الذى يحتوى على أكثر من 50 فى المائة كربون . وعندما يدفن الخُث نهائياً فإنه يتحول نتيجة عمليات ما بعد الترسيب إلى الفحم coal . وتتراكم أيضا بقايا الطحالب والبكتريا وبعض الكائنات الحية الدقيقة الأخرى كمادة عضوية فى الرواسب الموجودة فى مياه البحيرات والمحيطات ، وتتحول لاحقا إلى نفط وغاز .

ج - الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب: التحول من راسب إلى صخر رسوبى

تحمل الأنهار والرياح والمثالج الجزء الأكبر من الرواسب الفتاتية الناشئة عن تجوية وتعرية سطح اليابسة إلى قاع المحيط ، بينما يتبقى القليل منها على اليابسة . كما يحدث الشيء نفسه للرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية ، حيث يترسب الجزء الأكبر منها على قاع المحيط أيضا ، بينما يترسب القليل منها فى البحيرات والمستنقعات . وبالمقارنة بالرواسب التى ترسبت على اليابسة ، فإن نسبة أكبر من الرواسب المتراكمة على قاع المحيط تدفن وتحفظ لوقت طويل . وتهبط الرواسب الحيوية والكيميائية فى مياه المحيط ، حيث يتم اصطيادها بواسطة تيارات المحيط وتنقل إلى موقع ترسيبى جديد على قاع المحيط . أما الرواسب التى استقرت على القارات ، فإن نسبة كبيرة منها قد تترسب فى بيئات نهرية (طميية) وبحرية ضحلة العمق، وقد تدفن لتكوّن الصخور الرسوبية ، أو قد يكون قد سبق دفنها عميقا فى القشرة القارية. ولكن كيف يؤدى الترسيب إلى الدفن؟

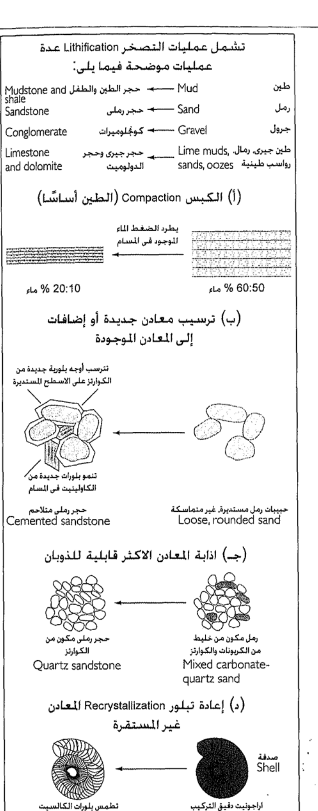
1- الدفن نتيجة تراكم الرواسب

يؤدى استمرار الترسيب فى البيئات المختلفة إلى تراكم كميات ضخمة من الرواسب التى تتميزبسحنات مختلفة . ويحدث تراكم الرواسب جزئيا نتيجة لهبوط **subsidence** القشرة بلطف فى منطقة ما بالنسبة للمناطق المحيطة بها . وينشأ الهبوط إما بسبب إضافة كميات من الرواسب تضغط على القشرة، وإما لأسباب تكتونية مثل الصدوع الإقليمية أو لكليهما. وأحواض الترسيب **sedimentary basins** عبارة عن مناطق تغطى مساحات كبيرة (على الأقل 10000كم^2) ، ترسبت فيها تراكمات سميكة من الرواسب والصخور الرسوبية . وتأخذ تراكمات السحنات المختلفة الموجودة فى تلك الأحواض أشكالاً هندسية ، تتراوح من قيعان ضيقة إلى منخفضات دائرية أو بيضاوية تشبه الملعقة . وتتواجد معظم الصخور الرسوبية فى العالم فى هذه الأحواض ، والتى قد تصبح عبارة عن خزانات لمعظم تجمعات النفط والغاز . وتخضع ميكانيكية هبوط الأحواض وتراكم الرواسب بها لكثير من الأبحاث حاليا .

2. تغيرات ما بعد الترسيب: تحول الراسب إلى صخر بالحرارة والضغط والتغيرات الكيميائية

تتعرض الرواسب بعد عمليتى الترسيب والدفن إلى تغيرات ما بعد الترسيب . وتعرف **عمليات ما بعد الترسيب diagenesis** بأنها التغيرات الكيميائية

والفيزيائية التى تحدث فى الرواسب المدفونة مثل التصخر lithification والكبس compaction ، والتى تؤدى إلى تحول الراسب إلى صخر رسوبى . وهذه التغيرات تحدث بعد الترسيب وقبل عملية التحول التى تؤثر فى الراسب وتحوله من مادة رسوبية إلى صخر متحول بالحرارة والضغط . ولاتشمل عمليات مابعد الترسيب عملية التجوية . ويعمل الدفن على زيادة هذه التغييرات ، حيث إن الرواسب المدفونة تكون عرضة لدرجات الحرارة والضغط المتزايدة فى باطن الأرض . ويوضح شكل (2.7) تغيرات ما بعد الترسيب.



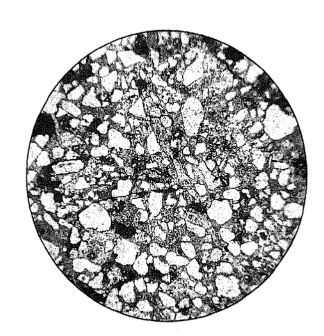
شكل (2.7): تؤدى عمليات مابعد الترسيب diagenesis إلى حدوث تغيرات فى التركيب والنسيج . وتؤدى معظم هذه التغيرات إلى تحول راسب غير متماسك إلى صخر رسوبى متماسك .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وتتزايد درجة حرارة الأرض مع العمق ، ولكن بمعدلات تتغير طبقا لنطاقات الأرض الداخلية (ويسمى معدل تزايد درجة الحرارة مع العمق "منحنى حرارة الأرض geotherm أو تدرج حرارة الأرض geothermal gradient") . ويتواجد أسرع معدل لتزايد درجة الحرارة فى القشرة الأرضية حيث ترتفع درجة الحرارة بمعدل 30°م لكل كيلو متر عمقا . فعند عمق 4 كم تقريبا ، قد تصل حرارة الرواسب المدفونة إلى نحو 120°م أو أكثر. ويحدث عديد من التفاعلات الكيميائية بين المعادن والماء المتواجد فى مسام الصخور الرسوبية ، وخصوصا عند درجات الحرارة المرتفعة هذه . والعامل الثانى المسبب لتغيرات ما بعد الترسيب هو زيادة الضغط مع العمق ، والذى يقدر بحوالى 1 ضغط جوى لكل 4.4 م فى العمق فى المتوسط ، وهذا الضغط هو المسئول عن كبس أو دمج الرواسب.

وحينما ترتفع درجة الحرارة ، فإن تغيرات ما بعد الترسيب تدخل فى نطاق عمليات التحول ، حيث تتراوح درجة الحرارة بين نحو 300°م و 350°م ، وهى تقابل نحو 10-12 كم عمقا .

التغير الكيميائى: التلاحم

التلاحم **cementation** هو عملية تغير كيميائى رئيسية تحدث بعد الترسيب ، حيث تترسب أثناءها معادن فى المسام بين حبيبات الراسب أو الصخر الرسوبى مكوّنه مادة لاحمة تربط بين هذه الحبيبات . وينتج عن التلاحم نقص فى المسامية **porosity** (النسبة المئوية لحجم المسام إلى الحجم الكلى للصخر) . كما يؤدى التلاحم أيضا إلى التصخر **lithification** وهو إحدى عمليات ما بعد الترسيب ، والتى يتصلد خلالها الراسب غير المتماسك إلى صخر صلد . فمثلاً ، قد يترسب كربونات الكالسيوم على هيئة معدن كالسيت فى بعض الرمال ، حيث يعمل الكالسيت كمادة لاحمة تربط الحبيبات وتسبب تصلد الكتلة الناتجة إلى حجر رملى (شكل 3.7). وقد تقوم بعملية التلاحم معادن أخرى مثل الكوارتز ، الذى يلحم حبيبات الرمل والطين والحصى ليحولها إلى حجر رملى وحجر طينى وكونجلومرات أو بريشيا .



شكل (3.7): حجر رملى حيث يترسب معدن الكالسيت كمادة لاحمة تربط حبيبات الكوارتز وتسبب تصلد الصخر . وسط الصحراء الشرقية – مصر .

كما يمثل التغير الكيميائى لمعادن الصلصال clay minerals ، والتى ترسبت أصلا كحبيبات فتاتية ، مثالا آخر على تغير كيميائى يحدث بعد الترسيب فى الرواسب والصخور الفتاتية ، حيث يتحول معدن الكاولينيت kaolinite إلى معدن الايليت illite ، وهو معدن صلصال مشابه لمعدن المسكوفيت ، وهو أحد معادن مجموعة الميكا .

التغير الفيزيائى: الكبس

تمثل عملية الكبس (الاندماج) **compaction** التغير الفيزيائى الأساسى فى مرحلة مابعد الترسيب ، ويؤدى إلى نقص فى حجم ومسامية الرواسب والصخور الرسوبية ، وتحدث هذه العملية عادة عندما تُكبَس الحبيبات لتقترب من بعضها بعضا نتيجة لزيادة وزن الرواسب التى تعلوها . ويتم تعبئة packing الرمال جيدا أثناء الترسيب ، ولذلك فإنها لا تتعرض كثيرا للكبس . أما الطين mud المترسب حديثا فتكون مساميته عالية ، حيث تصل نسبة الماء فى مسامه أكثر من 60 ٪. ولذلك ، يُكبس الطين بدرجة كبيرة بعد الدفن حيث يفقد أكثر من 50 ٪ من الماء الموجود به .

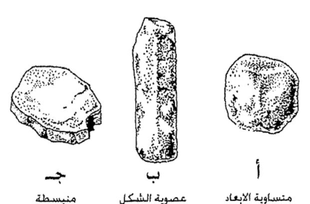
إعادة التبلور قد يعاد تبلور المعادن الأقل استقرارا إلى أشكال أكثر استقرارا . وتعرف هذه العملية **بإعادة التبلور recrystallization** . فمعدن الأراجونيت هو الشكل الأقل استقرارا لكربونات الكالسيوم ، كما أنه المكوّن الرئيسى للعديد من الأصداف التى تكوّن الرواسب الكربوناتية . وأثناء عمليات تغيرات ما بعد الترسيب ، وبعد بداية الدفن مباشرة ، يبدأ الأراجونيت فى إعادة التبلور إلى شكل من كربونات الكالسيوم أكثر استقرارا ، وهو معدن الكالسيت ، وهو أكثر معادن الحجر الجيرى شيوعا .

II. الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية

تصنف الرواسب وكذلك الصخور الرسوبية إلى قسمين رئيسيين : أولهما الرواسب الفتاتية ، وثانيهما الرواسب الكيماوية والكيميائية الحيوية . ويمثل القسم الأول والذى يشمل الطين والطفل والرمل والحجر الرملى والجَرْول والكونجلومرات أكثر من ثلاثة أرباع الصخور الرسوبية المكوّنة للقشرة الأرضية ، ولذلك سيتم تناولها أولاً .

أ. شكل الحبيبة

يوصف شكل الحبيبة أثناء دراسة الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية بثلاث صفات هى الشكل والتكور والاستدارة . ويوصف الشكل العام form للحبيبة بأنه متساوى الأبعاد equant عندما تكون أبعاد الحبيبة متساوية فى كل الاتجاهات ، كما توصف بأنها منبسطة (نضيدية) tabular عندما يكون هناك بعدان أكبر من البعد الثالث ، أو تأخذ شكل العصا rod-shaped (شكل 4.7) ، عندما يكون بعد واحد أكبر من البعدين الآخرين . أما التكور **sphericity** فهو مقياس لدرجة اقتراب شكل الحبيبة العام من شكل الكرة . وتوصف الحبيبة بأنها عالية التكور كلما كانت أقرب إلى شكل الكرة ، بينما توصف الحبيبات المنبسطة ، وتلك التى تشبه العصا بأنها منخفضة التكور. أما الاستدارة **roundness** فهى مقياس لدرجة حدة حواف الحبيبة . وتوصف الحبيبات التى حوافها حادة بأنها بالغة التزوى very angular ، بينما توصف الحبيبات التى تكون حوافها ناعمة ومستديرة بأنها جيدة الاستدارة well-rounded . ويؤدى استمرار عمليات التجوية الطبيعية لفترات زمنية طويلة، وكذلك نقل الحبيبات بتيارات المياه والرياح إلى تصغير حجم الحبيبات ، كما يؤدى إلى استدارة الفتات الرسوبى ذى الحواف الحادة (شكل 5.7) ؛ حيث تؤدى عملية نقل الفتات إلى تقليب الحبيبات واصطدامها بعضها ببعض ، أو احتكاكها بصخور الأساس فيحدث سحج abrasion للحبيبات ، وتصبح أكثر استدارة كلما زادت مسافة النقل .



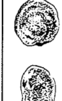
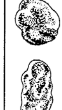
شكل (4.7): أشكال الحبيبات الرسوبية

(أ) متساوية الأبعاد (ب) عصوية الشكل (ج) منبسطة.

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

ب. الفرز

يعكس تصنيف الرواسب والصخور الفتاتية المختلفة على أساس أحجام الحبيبات ظروف ترسيب تلك الرواسب . وكما أوضحنا سابقا ، فكلما كان حجم الحبيبات أكبر ، كان التيار المطلوب للنقل والترسيب أقوى . ويؤدى هذا التلازم بين قوة التيار وحجم الحبيبات إلى فرز الحبيبات وترسبها فى طبقات مفروزة . ولذلك ، فإن معظم طبقات الرمل لا تحتوى على حصى أو طين ، كما تتكون معظم طبقات الطين من الحبيبات الدقيقة فقط. وتعرف عملية تجميع الرواسب فى مجموعات طبقا لحجم حبيباتها بعملية الفرز **sorting** ، حيث يكون الراسب جيد الفرز إذا كان مكوّنا فى معظمه من حبيبات متجانسة الحجم غالبا ،




شكل (5.7): استدارة roundness وتزوى angularity الحبيبات منخفضة وعالية التكور.

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

بينما يكون الراسب ردىء الفرز إذا كان مكوّنا من حبيبات مختلفة الحجم (شكل 6.7) .

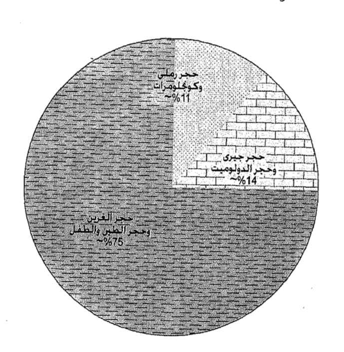
ويمكن تقسيم كل مجموعة من المجموعات الحجمية السابقة والمصنفة على أساس النسيج الصخرى إلى مجموعات أصغر ، بناءً على التركيب المعدنى الذى يعكس مكونات الصخور الأصلية . ولذلك فهناك حجر رملى غنى بالكوارتز وحجر رملى غنى بالفلسبار وصخور طفل جيرية وأخرى سيليسية

شكل (6.7): درجة فرز sorting الحبيبات ، وهو تصنيف الرواسب فى مجموعات طبقا لحجمها . فيتكون الراسب جيد الفرز من حبيبات متقاربة الحجم ، بينما يتكون الراسب ردىء الفرز من حبيبات مختلفة الأحجام .

(After Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

أو غنية بالمواد العضوية . وبعض الرواسب تكون فتاتية عضوية ، حيث تتكون من مواد مثل الكربونات ترسبت أصلاً على هيئة أصداف ولكن كسرت ونقلت بالتيار نقلا ميكانيكيا .

ويعتبر الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطيني والطفل من أكثر أنواع الرواسب الفتاتية انتشارا، حيث تمثل نحو ثلاثة أضعاف الصخور الفتاتية الخشنة الحبيبات (شكل 7.7) . ويعكس انتشار الفتاتيات دقيقة التحبب والتي تحتوي على كميات كبيرة من معادن الصلصال ، أهمية الدور الذى تلعبه التجوية الكيميائية لكميات كبيرة من الفلسبار والمعادن السيليكاتية الأخرى لتكوين معادن الصلصال فى القشرة الأرضية .



شكل (7.7): الانتشار النسبى لأنواع الصخور الرسوبية الرئيسية . تتواجد أنواع الصخور الرسوبية الأخرى ، والتى تشمل المتبخرات والتشرت والرواسب الكيميائية الأخرى بكميات ضئيلة . بينما تمثل الصخور الفتاتية أكثر من ثلاثة أرباع الصخور الرسوبية الموجودة فى القشرة الأرضية .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ج. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية

تصنف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية **clastic sediments and sedimentary rocks** بناءً على حجم الحبيبات إلى ثلاث مجموعات رئيسية (جدول 2.7) كالتالى .

- خشنة الحبيبات ، وتشمل الجرول gravel والكونجلومرات conglomerate والبريشيا breccia .
- متوسطة الحبيبات ، وتشمل الرمل sand والحجر الرملى sandstone .
- دقيقة الحبيبات ، وتشمل الغرين silt وحجر الغرين siltstone والطين mud وحجر الطين mudstone والطفل shale و الصلصال clay وحجر الصلصال claystone .

وسنناقش فيما يلى الخصائص المميزة لكل من هذه المجموعات الثلاث للرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية بشىء من التفصيل:

1. الفتاتيات خشنة التحبب: الجرول والكونجلومرات

يعتبر الجرول من أخشن الرواسب الفتاتية ، حيث يتكون من حبيبات يزيد قطرها على 2 مم ، ويشمل : الجرول رواسب الجلاميد boulders والحصى الكبيرcobbles والحصى pebbles (جدول 2.7) . والجرول هو المقابل المفكك لصخر **الكونجلومرات conglomerate** والبريشيا **breccia** ، أى أن الكونجلومرات عبارة عن جرول تماسكت حبيباته وتصلدت (شكل 8.7 أ) . وتختلف الكونجلومرات عن البريشيا فى كون حبيباتها أكثر استدارة (شكل 8.7 ب) . ونظرا لكبر حجم الحبيبات فى تلك الصخور ، فإنه يسهل دراستها وتعريفها . حيث يشير مثلا وجود حصى جرانيتى فى كونجلومرات ترسب بنشاط الأنهار، إلى وجود كتلة من الجرانيت منكشفة فى مناطق الصرف drainage areas التى تغذى الأنهار التى قامت بنقل الجرول .

جدول (2.7): المجموعات الرئيسية للرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية

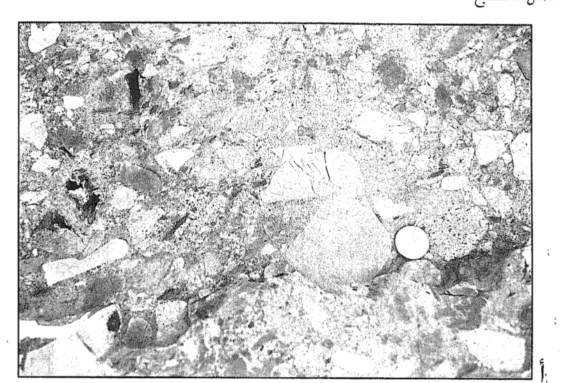
حجم الحبيبات Particle size		الراسب Sediment		الصخر Rock
خشن	أكبر من 256 مم	جلمود boulder	جرول gravel	بريشيا breccia وكونجلومرات conglomerate
	64-256 مم	زلط cobble		
	2-64 مم	حصاة pebble		
متوسط	0.062-2 مم	رمل sand		حجر رملى sandstone
ناعم	0.0039-0.062 مم	غرين silt	طين mud	حجر الغرين siltstone
	أقل من 0.0039 مم	صلصال clay		حجر الطين mudstone (تشقق كتلى)
				الطفل shale (رقائق موازية لأسطح الطباقية)
				حجر الصلصال claystone

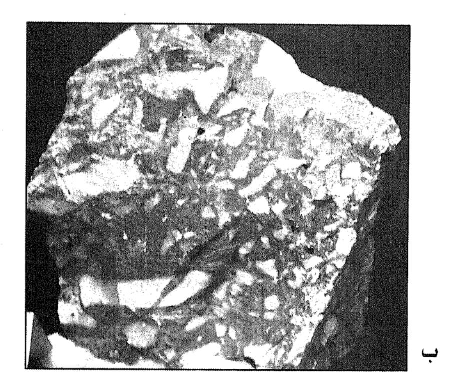
ويوجد عدد ضئيل نسبيا من البيئات التى تتميز بوجود تيارات قوية بدرجة تكفى لنقل الحصى مثل مجارى المياه فى منحدرات الجبال شديدة الانحدار ، والشواطئ الصخرية التى تضربها الأمواج العالية ، والمياه المنصهرة من الثالج . كما قد تحمل التيارات القوية الرمال أيضا ، حيث يترسب بعض الرمل مع الجرول والبعض الآخر يترسب فى المسام بين الكسرات بعد ترسيب الرواسب الفتاتية الكبيرة . ويؤدى نقل الحصى والحصى الكبير على الأرض أو فى الماء إلى بريها واستدارتها ، حيث يسبب النقل لمسافة 100 كم استكمال استدارة الحصى وجعلها ناعمة . وتتحرك حبيبات جرول الشواطئ للأمام والخلف باستمرار بواسطة الموجات القوية مما يؤدى إلى استدارتها أيضا . أما إذا سلمت الحبيبات وكسرات الصخور من البرى ، وبقيت ذات زوايا حادة ، فإنها يطلق عليها بريشيا رسوبية sedimentary breccias (شكل 8.7 ب). وتوجد البريشيا الرسوبية فى الرواسب القريبة من المصدر الذى نشأت منه ، والتى لم تنقل لمسافات بعيدة. وليست كل البريشيا ذات أصل رسوبى ، فقد تتكون بعض البريشيا بسبب تكسر مواد بركانية عند الانفجارات البركانية (بريشيا بركانية) أو قد تتكون البريشيا بسبب تكسير الصخور على امتداد أسطح الصدوع (بريشيا الصدوع) .

2 - الفتاتيات متوسطة التحبب: الرمل والحجر الرملى

يتكون الرمل **sand** من حبيبات متوسطة الحجم يتراوح قطرها بين 0.062 إلى 2 مم (جدول 2.7). وتتحرك هذه الرواسب بفعل تيارات متوسطة القوة مثل تلك الموجودة بالأنهار وبيئات خط الشاطئ والرياح التى تذرو الرمال فى الكثبان الرملية . وتكون حبيبات الرمل كبيرة بدرجة تسمح برؤيتها بالعين المجردة ، كما يمكن رؤية عديد من الملامح المميزة لحبيبات الرمل ، باستخدام عدسة مكبرة ذات قوة تكبير صغيرة .

والمقابل الصخرى للرمل هو الحجر الرملى **sandstone** (شكل 3.7) . وقد حظى الحجر الرملى بأكبر قدر من الاهتمام مقارنة بالمجموعات الفتاتية الأخرى ، بسبب انتشاره الواسع ، وسهولة تعرف





شكل (**8.7**): الصخور الرسوبية الفتاتية:

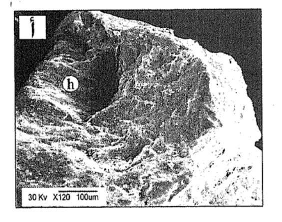
(أ) كونجلومرات conglomerate (كونجلومرات الحمامات . طريق قفط – القصير . أ. د. ممدوح عبد الغفور حسن هنبر المواد النووية).

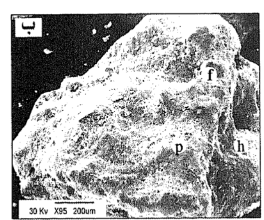
(ب) بريشيا **breccia** ، منطقة سوهاج ، وادى النيل – مصر . (مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان ، قسم الجيولوجيا ، جامعة عين شمس).

أصل نشأته وظروفها . فتحتوى مثلا عديد من الأحجار الرملية على طباقية متقاطعة ، والتى تدل على اتجاه التيار الناقل ، لذلك فإن الأحجار الرملية تكون ذات أهمية فى عمل خريطة للتيارات القديمة التى تدل على اتجاه المجرى المائى السابق أو الرياح أو تدفق المياه فى البحار الضحلة .

أحجام حبيبات الرمل: تصنف حبيبات الرمل إلى دقيقة الحجم أو متوسطة أو خشنة . ويعكس متوسط حجم الحبيبات فى الحجر الرملى كلاً من حجم البلورات التى تم تجويتها من الصخر الأصلى ، وقوة التيار الذى حملها . ولا يدل حجم الحبيبات على كل تفصيلات النشأة ، حيث إن مدى حجم الحبيبات ، ونسبة انتشار الأحجام المختلفة لها أهمية أيضا . فإذا كانت أحجام الحبيبات متقاربة ، فإن الرمل يكون جيد الفرز . أما إذا كان الكثير من الحبيبات ذات حجم أكبر أو أصغر من متوسط الأحجام ، فإن الرمل يكون ردىء الفرز. وقد تساعد درجة الفرز فى التمييز بين رمال الشواطئ (جيدة الفرز) ، والرمال الطينية المترسبة بواسطة المثالج (رديئة الفرز) .

أشكال حبيبات الرمل: تعتبر أشكال حبيبات الرمل مهمة أيضا فى الاستدلال على ظروف نشأة الرمال. فحبيبات الرمل مثل الحبيبات الفتاتية الأخرى تكون مستديرة نتيجة البرى حيث تصطدم بعضها البعض أثناء النقل . وتدل استدارة الحبيبات على المسافة الطويلة التى قطعتها الحبيبات فى مجرى النهر الطويل أثناء النقل ، بينما تدل الحبيبات المزواة على النقل لمسافات قصيرة. وتصبح حبيبات الرمل مستديرة أيضا نتيجة الحركة للأمام والخلف بواسطة الأمواج على الشواطئ . ومع ذلك ، فإن معظم حبيبات الرملّ تأخذ أشكالها الكروية والمستطيلة أو المنبسطة من أشكال البلورات الأصلية فى الصخر الأصلى.





شكل (9.7): الملامح المميزة لأسطح حبيبات رمل من الكوارتز كما ترى من خلال المجهر الإلكترونى الماسح scanning electron microscope (SEM) ، جبال العوهة – الحوية – الإمارات العربية المتحدة .

(أ) سطح حبيبة مزواة angular من الكوارتز تظهر حفرة عميقة مستطيلة (h) تكونت نتيجة الإذابة المستمرة لفترة طويلة للسيليكا على سطح حبيبة الكوارتز .

(ب) مستويات كسر متدرجة (f) وحفر (p) وحفرة عميقة (h) تكونت نتيجة التصادم بين حبيبتى رمل أو حبيبة رمل وسطح خشن . وتميز تلك الملامح المتكونة ميكانيكيا الرواسب الشاطئية .

(After El Saiy, A. K., 2004: Facies, depositional environments and diagenesis of the Upper Cretaceous-Lower Tertiary sediments at Auha-Al Faiyah stretch, United Arab Emirates. Ph. D. thesis, Faculty of Science, U.A.E. University, U.A.E).

كما تتم أيضا دراسة أسطح الحبيبات باستخدام المجهر الإلكترونى الماسح Scanning electron microscope (SEM) لإظهار ملامح مميزة تستخدم للاستدلال منها على الظروف التى تعرضت لها الرواسب أثناء النقل والترسيب (شكل 9.7 أ و ب) .

التركيب المعدنى: يمكن التنبؤ بطبيعة المصادر التى تمت تجويتها لتكوين حبيبات الرمل ، من خلال دراسة التركيب المعدنى للرمال والأحجار الرملية . حيث يدل وجود فلسبارات غنية بالصوديوم أو البوتاسيوم مع وفرة الكوارتز على أن الرواسب تم تجويتها من مناطق جرانيتية. كما تدل بعض المعادن الأخرى مثل الكيانيت والاشتوروليت على أن الصخور الأصلية كانت صخورا متحولة.

وقد لايتفق التركيب المعدنى للرمل أو الحجر الرملى بالضبط مع التركيب المعدنى للصخر الأصلى ، حيث تعمل التجوية الكيميائية على إذابة معظم فلسبار الصخر الأصلى كالجرانيت بحيث لا يتبقى إلا حبيبات الكوارتز . ولذلك فإننا نستطيع من تحليل التركيب المعدنى للرمل أو الحجر الرملى ، أن نستنتج نوع الصخر الأصلى ، بالإضافة إلى بعض المعلومات عن العوامل التى أثرت فى التجوية فى منطقة الصخر الأصلى مثل المناخ . كما يمكن أيضا مضاهاة التركيب المعدنى للصخور الأصلية بالأوضاع فى تكتونية الألواح. فعلى سبيل المثال ، فإن الأحجار الرملية المحتوية على وفرة من كسرات الصخور البركانية المافية تكون قد نشأت من أقواس بركانية volcanic arcs عند نطاقات الاندساس .

الأنواع الرئيسية للأحجار الرملية: يمكن تقسيم الأحجار الرملية إلى عدة مجموعات رئيسية بناءً على التركيب المعدنى والنسيج وهى:

- كوارتز أرينيت **quartz arenite** ويتكون كلية من حبيبات كوارتز ، جيدة الفرز ومستديرة عادة (شكل 10.7 أ). وتنشأ هذه الرمال المكوّنة من حبيبات الرمل الخالصة نتيجة التجوية الشاملة التى حدثت قبل وأثناء النقل وأزالت كل المعادن ماعدا الكوارتز ، وهو أكثر المعادن ثباتا واستقرارا .
- أركوز **arkose** : ويحتوى على أكثر من 25 ٪ فلبسار، حيث تميل الحبيبات أن تكون مزواة إلى شبه مستديرة وأقل فى درجة الفرز عن الحجر الرملى المكوّن من الكوارتز الخالص (شكل 10.7 ب) . وتنشأ هذه الأحجار الرملية الغنية بالفلسبارات من التجوية السريعة لمناطق مكونة من صخور جرانيتية ومتحولة ، حيث تكوّن التجوية الكيميائية أقل تأثيرا من التجوية الفيزيائية .
- حجر رملى صخرى **lithic sandstone** : وهو يحتوى على عديد من الكسرات المستمدة من صخر دقيق التحبب غالبا مثل الطفل ، أو صخور بركانية وصخور متحولة دقيقة التحبب (شكل 10.7ج)
- جريواكى **graywacke** : وهو صخر رصاصى قاتم اللون ، صلد ، يتكون من خليط غير متجانس من كسرات صخرية وحبيبات مزواة رديئة الفرز من الكوارتز والفلسبار، فى حجم حبيبات الرمل مدفونة فى أرضية صلصالية دقيقة التحبب (شكل10.7 د). وتكونت معظم هذه الأرضية نتيجة التغير الكيميائى والكبس الميكانيكى والتشوه لكسرات صخور لينة نسبيا – مثل : صخور الطفل وبعض الصخور البركانية –بعد الدفن العميق للحجر الرملى .

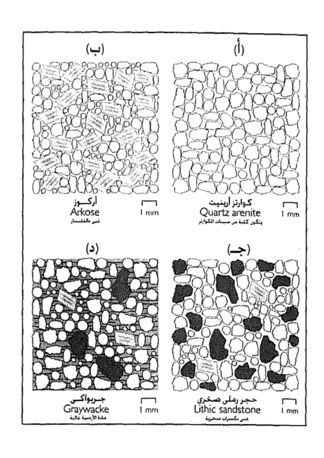
اليورانيوم المستخدم فى مشاريع توليد الطاقة النووية والأسلحة النووية يُحصَل عليها من اليورانيوم الناتج من عمليات ما بعد الترسيب فى الحجر الرملى .

3- الفتاتيات دقيقة التحبب : الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطينى والطفل

يعتبر الغرين وحجر الغرين والطين والحجر الطينى والطفل أدق الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية حجما . ويقل قطر الحبيبات المكوّنة لهذه الرواسب كلها عن 0.062مم ، ولكن تختلف هذه الحبيبات اختلافا كبيرا فى المدى الذى يقع فيه حجم الحبيبات وكذلك التركيب المعدنى . وتترسب الرواسب دقيقة التحبب بواسطة ألطف التيارات ، والتى تسمح لأدق الحبيبات أن تترسب ببطء إلى القاع فى وجود الأمواج الهادئة . وفيما يلى وصف لكل من هذه الأنواع :

الغرين وحجر الغرين: حجر الغرين siltstone هو المقابل الصخرى للغرين **silt** ، وهو راسب فتاتى يتراوح قطر حبيباته بين 0.0039 و 0.062 مم . ويكون حجر الغرين مشابها للحجر الطينى أو الحجر الرملى دقيق الحبيبات جدا .

الطين وحجر الطين والطفل: الطين mud هو أى راسب فتاتى تكون فيه قطر معظم الحبيبات أقل من 0.062مم (جدول 2.7). ويترسب الطين بالأنهار وفى مناطق المد والجزر. فبعد أن يفيض النهر فى الأراضى المنخفضة ، وبعد أن يتراجع ويتقهقر الفيضان ، يبطئ التيار ويترسب الطين الذى يؤدى إلى خصوبة أراضى قاع النهر. كما تتخلف رواسب الطين نتيجة انحسار المد على امتداد عديد من مسطحات المد والجزر ؛ حيث يكون تأثير الأمواج معتدلا . وتغطى رواسب الطين معظم قيعان المحيطات العميقة حيث تكون التيارات ضعيفة أو منعدمة.



شكل (10.7): التركيب المعدنى لأربعة أنواع رئيسية من الحجر الرملى .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويهتم كل من جيولوجيى المياه الجوفية والبترول بدراسة الحجر الرملى. ويعول جيولوجيو المياه الأرضية على فهم أصل الحجر الرملى للتنبؤ بإمكانة وجود مصادر للمياه فى مناطق بها حجر رملى مسامى ، مثل متكوّن الحجر الرملى النوبى ، والذى يشغل مساحات واسعة فى مصر (أكثر من 90 ٪) سواءً فوق السطح أو تحت السطح (شكل 7.13) . ويجب أن يهتم جيولوجيو البترول بدراسة مسامية ودرجة التحام الحجر الرملى ، حيث إن النفط والغاز المكتشفين خلال المائة وستين عاما الماضية قد وجدا فى صخور حجر رملى مدفونة . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن نسبة كبيرة من

والصخر دقيق التحبب المقابل لراسب لطين هو حجر الطين والطفل . وحجر الطين **mudstone** هو صخر كتلى به ترقق fissility ضعيف أو غير موجود على الإطلاق . ويتكون الطفل **shale** من الغرين والصلصال . وتتميز هذه الصخور بوجود مستويات تطبق ، حيث تنفصل إلى رقائق على امتداد تلك المستويات . وقد يحتوى الطين وحجر الطين والطفل على أكثر من 10٪ كربونات ليكوّن رواسب من طفل كلسى (جيرى) ، بينما يحتوى الطفل الأسود أو العضوى على كمية وفيرة من المادة العضوية ، التى تكونت نتيجة عمليات ما بعد الترسيب ويطلق عليه طفل الزيتoil shales ، الذى قد يحتوى على كميات كبيرة من المادة العضوية الزيتية ، مما يجعله مصدرا مهما للنفط .

الصلصال وحجر الصلصال: تكوّن الحبيبات التى فى حجم الصلصال هى أكثر المكونات شيوعا فى الرواسب والصخور الرسوبية دقيقة التحبب . وجدير بالملاحظة أننا نشير هنا إلى أحجام الحبيبات ، وليس إلى معادن الصلصال clay minerals ، التى يقل قطرها عن 0.0039 مم ، والتى تتكون بنسبة كبيرة من معادن الصلصال (جدول 2.7) . وتسمى الصخور المكوّنة فى معظمها من حبيبات فى حجم الصلصال ، بحجر الصلصال **claystone** .كما قد يترسب تراب dust يشتمل على حبيبات فى حجم الصلصال وحجم الغرين بالرياح بعد العواصف الترابية على السهول القاحلة (فصل 14).

وتكوّن بعض معادن الصلصال الموجودة فى الرواسب دقيقة الحبيبات (وخاصة الكاولينيت) ذات قيمة اقتصادية ، حيث تستخدم فى صناعة الخزف ، كما قد تكوّن هذه الرواسب ، بالإضافة إلى بقية أنواع الصلصال تربة قديمة paleosols ، وهى المقابل المتحجر للتربة. وعلى الرغم من أن بعض هذه التربة القديمة لا يشبه التربة الحديثة الآن، إلا أنها قد تظهر قطاعًا معدنيًّا مستمدًا بوضوح من قطاع تربة قديمة (الفصل السادس) .

III. الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية

تمدنا الرواسب والصخور الفتاتية بما يكفى من المعلومات عن طبيعة الصخور القارية التى نشأت منها، وظروف تجويتها . كما تمدنا الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية أيضا بما يكفى من المعلومات عن الظروف الكيميائية فى بيئة الترسيب التى تكون فى معظم الأحيان هى المحيط . كما يحدث الترسيب الكيميائى فى البحيرات أيضا ، وخاصة تلك المتواجدة فى المناطق القاحلة حيث يكون التبخير شديدا ، إلا أن مثل تلك الرواسب لا تمثل إلا نسبة صغيرة جدا بالنسبة لكمية الرواسب المتكونة على امتداد خطوط شواطئ المحيطات ، وعلى الرفوف القارية وفى أعماق المحيطات.

أ. تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية

تصنف الرواسب غير الفتاتية إلى مجموعتين هما : الرواسب الكيميائية **chemical sediments** والرواسب الكيميائية الحيوية **biochemical sediments** . ويقوم هذا التصنيف على أساس تركيبها الكيميائى (جدول 3.7). ويعكس هذا التصنيف فى حالة البيئات البحرية أنواع العناصر

الكيميائية المذابة فى ماء البحر والأيونات الأكثر شيوعا لتلك العناصر وهى : الكلوريد (Cl^-) والماغنسيوم (Mg^{2+}) والصوديوم (Na^+) والكبريت (على هيئة كبريتات SO_4^{2-}) والبوتاسيوم (K^+) والكربونات (CO_3^{2-}) والكالسيوم(Ca^{2+}) . كما يتواجد فى ماء البحر مكوّنان رئيسيان لبعض الصخور الرسوبية ولكن بكميات ضئيلة هما السيليكا (SiO_2) والفوسفور . وتمثل الكائنات الحية المكوّن الأساسى فى الرواسب الكيميائية الحيوية . وتساهم أصداف الكائنات الحية المترسبة بعمليات كيميائية حيوية فى تكوين الكثير من الرواسب الكربوناتية فى العالم ، حيث إن الكربونات هى أكثر الرواسب غير الفتاتية انتشارا. وقد تترسب الرواسب الكيميائية بعمليات كيميائية فقط ، ولكنها أقل انتشارا نسبيا .

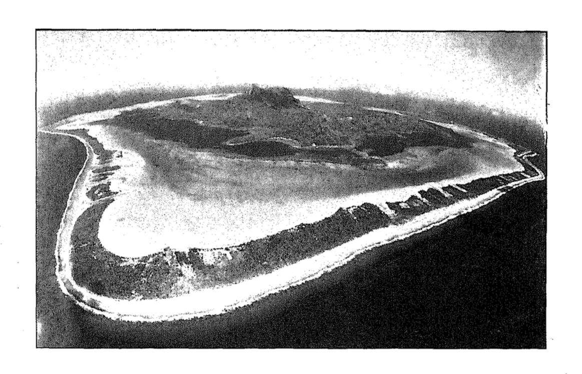
1. الرواسب والصخور الرسوبية الكربوناتية : الحجر الجيرى وحجر الدولوميت

تتكون الرواسب والصخور الرسوبية الكربوناتية **carbonate sediments and sedimentary rocks** من تراكم معادن كربونات تكونت عضوياً أو بطريقة غير عضوية . وقد تتكون المعادن أثناء عملية الترسيب أو عمليات ما بعد الترسيب . وقد تتكون المعادن من كربونات كالسيوم أو كربونات كالسيوم وماغنسيوم. ويرجع انتشار الصخور الكربوناتية إلى وجود كميات كبيرة من الكالسيوم والبيكربونات فى مياه البحار ، وتستمد الكربونات من ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى ، بالإضافة إلى الكالسيوم من الحجر الجيرى السهل التجوية على القارات .

وتتكون معظم الرواسب الكربوناتية فى البيئات البحرية الضحلة من فتات عضوى أفرزته الكائنات العضوية بطريقة كيميائية حيوية كأصداف لها . وتعيش تلك الكائنات العضوية بالقرب من سطح الماء فى المحيطات أو على قاع المحيطات ثم تكسرت أصدافها بعد موتها ونقلتها التيارات البحرية . وتتواجد هذه الرواسب فى الشعاب المرجانية coral reefs فى المحيط الهادئ ، أو ملاصقة للشواطئ الضحلة لجزر البهاما . وبخلاف هذه المناطق الخلابة، فإن هذه الرواسب تنتشر فى قيعان المحيطات العميقة ، وهى الأماكن التى تترسب فيها معظم الكربونات حاليا . إلا أنها من العمق بحيث يصعب الوصول إليها لدراستها .

الرواسب الكربوناتية العضوية: تتكون معظم الرواسب الكربوناتية فى المحيط من الكالسيت المكوّن للأصداف وهياكل الفورامينيفرا **Foraminifera** ، وهى كائنات بحرية وحيدة الخلية تعيش فى المياه السطحية، بالإضافة إلى الكائنات الحية الأخرى التى تفرز كربونات الكالسيوم الذى استخرجته من مياه البحار. وعندما تموت الكائنات الحية فإن أصدافها وهياكلها تستقر وتتراكم على قاع المحيط لتكوّن رواسب . وتحتوى معظم الرواسب الكربوناتية على معدن الأراجونيت بالإضافة إلى الكالسيت ، وهو شكل أقل استقرارا من الكالسيت . وكما هو معروف ، فإن بعض الكائنات الحية تكوّن هياكلها من الكالسيت بينما تكون الأخرى من الأراجونيت ، بينما يتكون بعضها من كليهما.

وتبنى الشعاب **reefs** هضابا صلبة ملتحمة صغيرة من الهياكل الكربوناتية لملايين الكائنات الحية ، أو تراكيب عضوية تشبه الحيود ، تقاوم الأمواج وترتفع إلى أعلى حتى سطح البحر أو فوقه قليلاً (شكل 11.7). وتبنى المراجين corals معظم الشعاب من كربونات الكالسيوم فى البحار الدافئة فى عالم اليوم . وهى تراكيب صلبة تختلف عن الرواسب المتراكمة فى صورة لينة فى بيئات أخرى . ويتكون الحجر الجيرى الصلب فى الشعاب مباشرة بفعل الكائنات الحية ، حيث لا توجد مرحلة انتقالية بينه وبين الراسب اللين . ويعيش فوق تلك الشعاب وحولها مئات من أنواع الكائنات الحية الأخرى المكوّنة للكربونات ، مثل القواقع والمحاريات التى تعيش قرب خطوط الشواطئ الحالية . كما تكوّن الطحالب البحرية الكربونات أيضا ، وهى كائنات حية وحيدة الخلية تشبه النباتات البدائية والتى تنمو على الشعاب وفى بيئات كربوناتية أخرى .



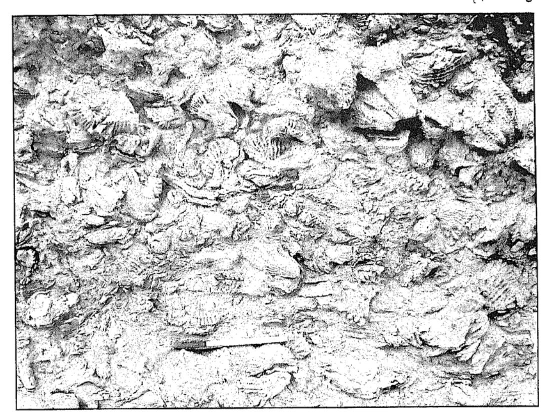
شكل (**11.7**): شعاب مرجانية coral reefs تحيط بجزيرة بركانية فى المركز . وتظهر الشعاب المرجانية فى مقدمة الصورة ، حيث تكون ساترًا لبحيرة لاجون خلفها .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

جدول (3.7): تصنيف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية

الراسب	الصخر	التركيب الكيميائي	المعادن
كيميائى Chemical			
لايتكون بالترسيب المباشر (تكوّن نتيجة عمليات مابعد الترسيب)	حجر الدولوميت Dolostone	كربونات الكالسيوم والماغنسيوم $CaMg(CO_3)_2$	دولوميت Dolomite
راسب أكسيد حديد	متكون الحديد Iron Formation	سيليكات وأكاسيد وكربونات حديد Fe_2O_3	هيماتيت Hematite ليمونيت Limonite سيدريت Siderite
راسب تبخرى	متبخرات Evaporite	كلوريد صوديوم وكبريتات كالسيوم $NaCl, CaSO_4$	جبس Gypsum أنهيدريت Anhydrite هاليت Halite أملاح أخرى
لايتكون بالترسيب المباشر (يتكوّن نتيجة عمليات مابعد الترسيب)	فوسفات Phosphorite	فوسفات كالسيوم $Ca_3(PO_4)_2$	أباتيت Apatite
سرئيات (بطروخيات) مترسبة كيميائيا من ماء البحر-كربونات مترسبة مباشرة من ماء البحر.	حجر جيرى Limestone ترافرتين - توفا	كربونات كالسيوم	كالسيت (أراجونيت)
كيميائى حيوى Biochemical			
رمل وطين (أساسا فتاتى حيوى)	حجر جيرى Limestone	كربونات كالسيوم $CaCO_3$	كالسيت Calcite (أراجونيت Aragonite)
راسب سيليكى	تشرت Chert	سيليكا SiO_2	أوبال Opal كالسيدونى Chalcedony كوارتز Quartz
خُث (بيت)، مادة عضوية	صخور عضوية Organics	مركبات كربونية كربون متراكب مع أكسيجين وهيدروجين	فحم Coal زيت خام Oil غاز طبيعى Gas

رواسب الكربونات غير العضوية: كان يعتقد حتى وقت قريب أن كل كربونات الكالسيوم أصلها عضوى، ولا تتكون مباشرة من ماء البحر. ولكن أوضحت البحوث التى أجريت على البحيرات الشاطئية (اللاجونات lagoons وهى بحيرات مالحة ضحلة تجاور البحر وقد تتصل به) وعلى المنحدرات الصاعدة فى جزر البهاما أن جزءا كبيرا من الطين الكربوناتى فى هذه المناطق الضحلة قد ترسب لا عضوياً، بشكل مباشر من ماء البحر. والأساس الكيميائى لترسيب الكربونات لاعضوياً هو توافر أيونات الكالسيوم(Ca^{2+}) والبيكربونات (HCO_3^-) بدرجة كافية فى ماء البحر. ويتوافر ذلك بصفة خاصة فى المناطق الاستوائية الدافئة من المحيطات، ويترسب الكربونات نتيجة التفاعل الكيميائى التالى:



شكل (12.7): حجر جيرى حفرى كوكينا (coquina) طريق سفاجا – القصير ، الصحراء الشرقية ، مصر . (د. ضياء الدين محمد كامل ، قسم الجيولوجيا ، جامعة القاهرة) .

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H_2CO_3$$

أيون الكالسيوم + أيون بيكربونات (مذاب) ← كربونات الكالسيوم (ترسيب) + حمض كربونيك (مذاب)

وعندما تفرز الكائنات العضوية الحية الأصداف الكربوناتية ، فإنها تعتمد على التفاعل الكيميائى نفسه ولكن بوسائل كيميائية حيوية.

رواسب الكربونات من أصل مختلط: تتكون بعض الرواسب الكربوناتية من رواسب الطين الكربوناتى دقيقة التحبب ، والتى نشأت من أصل مختلط (عضوى وغير عضوى) ؛ حيث تتكون هذه الرواسب من كسرات ميكروسكوبية الحجم من الأصداف والطحالب الجيرية ، ومعها رواسب غير عضوية.

وتمثل الأرصفة الكربوناتية **carbonate platforms** بيئات كربوناتية أخرى فى كل من العصور الجيولوجية القديمة والحديثة ، مثل شواطئ جزر البهاما . وهذه الأرصفة عبارة عن مساحات مستوية ممتدة وضحلة ؛ حيث يتم ترسيب كل من الكربونات الحيوية وغير الحيوية. ويوجد تحت مستوى الرصيف منحدرات كربوناتية ، وهى منحدرات لطيفة تتجه ناحية المياه العميقة وتتراكم عليها رواسب كربوناتية معظمها دقيقة التحبب .

وفيما يلى وصف لأكثر الصخور الكربوناتية شيوعا:

الحجر الجيرى وهو أكثر الصخور الرسوبية المتكونة بالعمليات الكيميائية الحيوية شيوعا . ويتكون **الحجر الجيرى limestone** أساسا من كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) فى صورة معدن الكالسيت .

وهناك نوع من الحجر الجيرى يسمى كوكينا coquina(شكل 12.7) يتكون من تلاحم أصداف تراكمت على القاع الضحل للبحر بالقرب من الشاطئ. ويتميز هذا الصخر بنسيج فتاتى ، ويكون عادة خشن الحبيبات حيث يمكن تمييز الأصداف وفتاتها . أما الطباشير chalk فهو نوع من الحجر الجيرى الفتاتى العضوى فاتح اللون مسامى ودقيق الحبيبات ، ويتكون من تراكم هياكل كائنات حية ميكروسكوبية بحرية على قاع البحر .

والحجر الجيرى السرئى (البطروخى) oolitic limestone هو نوع من الحجر الجيرى غير العضوى يتكون نتيجة تلاحم سرئيات oolites وهى كرات صغيرة فى حجم حبيبات الرمل (0.062 - 2 مم) ، وتتكون من الكالسيت غير العضوى الذى ترسب فى ماء بحر ضحل دافئ . وتعمل تيارات المد والجزر القوية على دحرجة السرئيات للأمام والخلف يوميا، مما يعمل على ثبات شكلها الكروى أثناء نموها . وقد يساهم تأثير الأمواج فى نمو السرئيات (البطروخيات).

أما التوفا tufa والترافرتين travertine فهى أحجار جيرية غير عضوية تتميز بنسيج متبلور ، وتتكون بترسيب كربونات الكالسيوم من ماء عذب . وترسب التوفا من محلول مائى يخرج من ينبوع أو بحيرة فوق اليابسة . وقد يتكون الترافرتين فى الكهوف عندما تفقد قطرات صغيرة من الماء الغنى بالبيكربونات المذابة ثانى أكسيد الكربون نتيجة انخفاض الضغط داخل الكهف .

حجر الدولوميت: وهو من الصخور الجيرية الشائعة أيضا ، ويتكون من معدن الدولوميت الذى هو عبارة عن كربونات الكالسيوم والماغنسيوم $CaMg(CO_3)_2$ (جدول 3.7) . **وأحجار الدولوميت dolostones** أحد رواسب الكربونات والحجر الجيرى التى تعرضت لعمليات ما بعد الترسيب . ولا يتكون معدن الدولوميت بالترسيب المباشر من مياه البحر العادية ، أى كراسب أولى . كما أنه لا توجد كائنات حيه تفرز أصدافًا مكونة من معدن الدولوميت . وبدلاً من ذلك ، يتحول الكالسيت أو الأراجونيت المتكون أصلاً فى الرواسب الكربوناتية إلى دولوميت مباشرة بعد الترسيب نتيجة إحلال أيونات الكالسيوم بأيونات ماغنسيوم من ماء البحر الذى يتخلل ببطء مسام الرواسب .

Mg^{2+} + $2\,CaCO_3$ →
أيون ماغنسيوم + كالسيت →

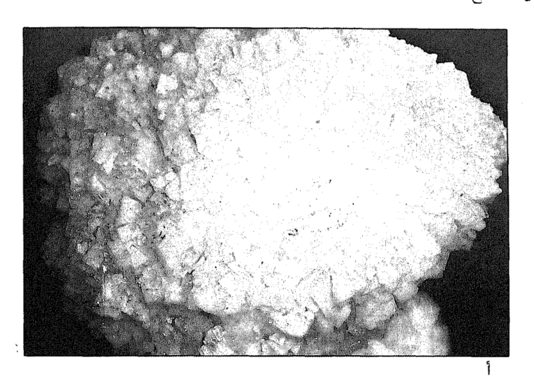
$CaMg(CO_3)_2$ + Ca^{2+}
دولوميت + أيون كالسيوم

وعند مقارنة التراكيب الرسوبية والتركيب المعدنى وأنسجة الرواسب الكربوناتية المتكونة حاليا بتلك الموجودة فى الأحجار الجيرية وأحجار الدولوميت القديمة ، يمكن معرفة كيف تكونت الصخور القديمة.

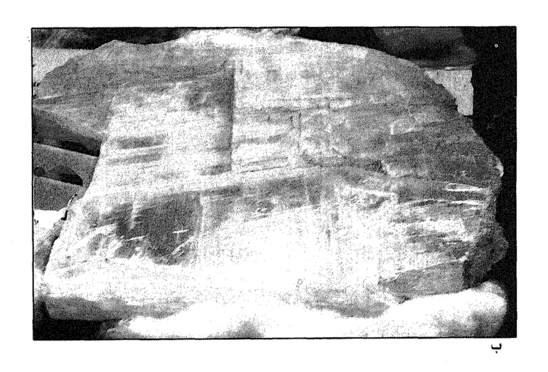
2. الرواسب والصخور الرسوبية التبخرية

تتكون الرواسب والصخور الرسوبية التبخرية evaporite sediments and sedimentary rocks لاعضويا ، من تبخر ماء البحر أو ماء البحيرات المتواجدة فى المناطق الجافة القاحلة ، والتى لا يغذيها تدفق نهرى من الخارج .

المتبخرات البحرية: **المتبخرات البحرية marine evaporites** هى رواسب وصخور رسوبية كيميائية تكونت نتيجة تبخر ماء البحر. وتحتوى هذه الرواسب والصخور بصفة أساسية على معادن تكونت نتيجة تبلور كلوريد الصوديوم المعروف باسم معدن الهاليت (شكل 13.7 أ) ، وكبريتات الكالسيوم (الجبس



أ



ب

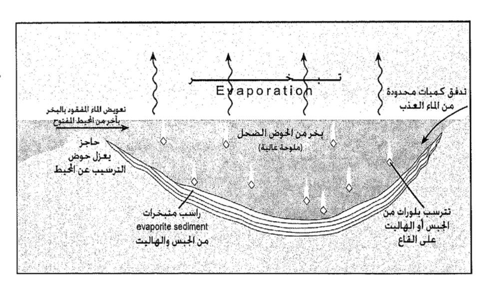
شكل (**13.7**): الصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية .
(أ) هاليت .
(ب) جبس ، منطقة العلمين – غرب إسكندرية – مصر .
(مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان ، قسم الجيولوجيا – جامعة عين شمس).

والأنهيدريت) شكل (13.7 ب) واتحاد أيونات أخرى شائعة فى ماء البحر. ويصبح ماء البحر أكثر تركيزاً كلما زادت عملية البخر، مما يؤدى إلى تبلور المعادن فى تتابع معين. وتتكون بعض المعادن نتيجة الترسيب المباشر (رواسب أولية) بينما تتكون معادن أخرى نتيجة تفاعلات ما بعد الترسيب. ويتغير تركيب ماء البحر باستمرار نتيجة تبخر ماء البحر وترسيب الأيونات الذائبة المكونة لتلك المعادن.

ويوضح الحجم الضخم للمتبخرات البحرية والتى يبلغ سمكها أحيانا بضع مئات من الأمتار، أنها لا يمكن أن تتكون من الكمية الصغيرة من المياه المتواجدة فى شرم ضحل أو بركة. لذلك فإن كمية ضخمة من ماء البحر لابد أن تكون تبخرت. والطريقة التى تتبخر بها كميات ضخمة من ماء البحر تكون واضحة فى الأشرم أو أذرع البحر التى تتوافر فيها ثلاثة شروط (شكل 14.7) وهى قلة الماء العذب المتدفق من الأنهار والاتصال المحدود بالبحر المفتوح والمناخ الجاف.

وفى مثل هذه المواقع يتبخر الماء باضطراد، بينما تسمح فتحات لماء البحر بالتدفق لتعويض الماء المتبخر من الشرم. ونتيجة لذلك، تبقى هذه المياه عند حجم ثابت، ولكنها تكون أكثر ملوحة من المحيط المفتوح. وتبقى مياه الشرم فوق مشبعة باستمرار وترسب باضطراد معادن تبخرية على قاع الحوض الذى تتم فيه عملية التبخير.

ومعادن الكربونات هى أول الرواسب التى تتكون عندما يبدأ ماء البحر فى التبخر، حيث يترسب الكالسيت أولاً، يليه الدولوميت نتيجة لتفاعلات ما بعد الترسيب. ويؤدى التبخير المستمر إلى ترسيب الجبس**gypsum**، (كبريتات الكالسيوم $CaSO_4.2H_2O$) (شكل 13.7 ب و 14.7)، والجبس هو المكوّن الرئيسى للجص plaster. وباستمرار التبخر، يبدأ معدن الهاليت halite ($NaCl$) فى التبلور، وهو واحد من الرواسب الكيميائية التى تتكون من تبخر ماء البحر (انظر شكلى



شكل (**14.7**): تكوين صخور المتبخرات. يتكون الجبس والهاليت كرواسب متبخرات عندما يتبخر ماء البحر من أحواض الترسيب الضحلة ضعيفة الاتصال بالبحر المفتوح، حيث تكون الملوحة فى أحواض التبخير أعلى من ملوحة ماء البحر المفتوح؛ مما يؤدى إلى تكوّن الجبس بالترسيب، كما تؤدى استمرار الزيادة فى الملوحة إلى تبلور الهاليت.

After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company,)
.(New York

13.7 أو 14.7) . والهاليت هو ملح الطعام المستخدم فى حياتنا اليومية. وفى المراحل النهائية من التبخر ، وبعد تكوّن كلوريد الصوديوم، تترسب كلوريدات وكبريتات الماغنسيوم والبوتاسيوم.

وقد دُرِس هذا التتابع الترسيبى معمليًا ، ووجد أنه يتفق مع تتابع الطبقات الموجود فى بعض متكونات الملح الطبيعية. وتتكون معظم رواسب المتبخرات فى العالم من تتابعات سميكة من الدولوميت والجبس والهاليت ، ولكنها لا تحتوى على رواسب المرحلة النهائية . وقد لا تصل بعض التتابعات الأخرى إلى تكوّن معدن الهاليت . ويدل غياب المراحل النهائية على أن ماء البحر لم يتبخر كلية ، بسبب تعويض الماء المتبخر بمياه بحر عادية مع استمرار عملية التبخر.

المتبخرات غير البحرية: تتكون رواسب المتبخرات أيضا فى بحيرات المناطق الجافة (القاحلة) ، التى يدخل إليها قليل من المياه العذبة أو ربما لا تدخل إليها أى مياه عذبة على الإطلاق . وفى مثل هذه البحيرات ، يتحكم التبخر فى مستوى البحيرة ، وتتراكم الأملاح المستمدة من التجوية الكيميائية للصخور . ومن الأمثلة المعروفة فى العالم لمثل هذه البحيرات بحيرة قارون (بركة قارون) وهى البحيرة الوحيدة المالحة والدائمة والمغلقة فى مصر، حيث تقع فى الصحراء الغربية فى أعمق نقطة من منخفض الفيوم ، جنوب غرب القاهرة . وتغطى البحيرة مساحة 240 كم^2 ، وهى بحيرة ضحلة يتراوح عمق الماء فى معظم أجزائها مابين 2-5 م ، ويصل ارتفاع سطح الماء نحو 45 م تحت مستوى سطح البحر. وتتأثر البحيرة بعمليتين أساسيتين هما دخول الماء عن طريق مصرفين ومعدل التبخر العالى ، حيث إنها لاتتلقى الماء من النيل مباشرة . ويتراوح المعدل السنوى لدرجة ملوحة ماء البحيرة بين 39.7 و 42.3 جم/ لتر.

وفى المناطق الجافة (القاحلة) ، قد تتجمع فى بعض البحيرات الصغيرة أملاح غير عادية ، مثل أملاح البورات (مركبات لعنصر البورون) ، وتصبح المياه أكثر قلوية . ويكون الماء فى هذا النوع من البحيرات ساما . كما تكون هذه البحيرات مصادر مهمة لبعض الرواسب المعدنية الاقتصادية مثل البورات والنيترات.

3- الرواسب السيليكية: مصدر للتشرت

يعتبر التشرت **chert** من أول الصخور الرسوبية التى استخدمها القدماء فى الأغراض العملية . ويتكون التشرت من سيليكا (SiO_2) مترسبة نتيجة عمليات كيميائية أو كيميائية حيوية . وهو يتميز بصلادته الشديدة وإمكانية تهذيبه وتشكيله ، ولذا فقد استخدمه الصيادون القدماء فى صناعة أدوات الصيد وخاصة السهام . وللتشرت اسم شائع هو الصوان **flint** . وتوجد السيليكا فى معظم التشرت فى شكل كوارتز دقيق التبلور للغاية (خفى التبلور cryptocrystalline) . وتكون السيليكا فى التشرت الحديث أقل فى درجة التبلور (عديمة التبلور) لتكوّن ما يعرف بالأوبال opal ، وهو مثل الكوارتز يتكون من ثانى أكسيد السيليكون ولكن يحتوى على نسبة متغيرة من الماء($SiO_2.n\ H_2O$) .

وتترسب السيليكا أيضا بطريقة كيميائية حيوية ، مثل كربونات الكالسيوم ، حيث تفرز الكائنات الحية التى تعيش فى المحيط السيليكات على هيئة أصداف . وعندما تموت هذه الأحياء ، فإنها تغوص إلى قاع المحيط العميق حيث تتراكم أصدافها على هيئة طبقات من راسب السيليكا . وبعد دفن هذه الرواسب السيليكية تحت رواسب أخرى أحدث ، فإن مكوناتها تتلاحم نتيجة عمليات ما بعد الترسيب (الكبس) لتكوّن التشرت . كما يتواجد التشرت أيضا فى هيئة

عقيدات nodules (العقيدة هي كتلة مدورة أو منتظمة دون تركيب داخلى معين) وكتل غير منتظمة نتيجة عمليات ما بعد الترسيب وإحلال الكربونات فى الحجر الجيرى والدولوميت.

4. تكوين الرواسب بعمليات ما بعد الترسيب: فوسفوريت

الفوسفوريت أحد الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية التى تترسب فى البحر. ويسمى الفوسفوريت **phosphorite** أحيانا بصخر الفوسفات phosphate rock وهو يتكون من فوسفات الكالسيوم ، التى ترسبت من ماء بحر غنى فى الفوسفات فى أماكن على امتداد حواف القارات ، حيث تصعد تيارات الماء العميق البارد ، والمحتوية على الفوسفات وبعض المخصبات الأخرى . ويتكون الفوسفوريت بعمليات ما بعد الترسيب نتيجة التفاعل بين رواسب طينية أو كربوناتية والماء الغنى بالفوسفات.

5. رواسب أكسيد الحديد: مصدر لمتكوّن الحديد

متكوّنات الحديد **iron formations** عبارة عن صخور رسوبية تحتوى عادة على أكثر من 15٪ حديد ، فى شكل أكاسيد وسيليكات وكربونات . وقد تكونت معظم هذه الصخور فى فترة مبكرة من التاريخ الجيولوجى ، حيث كانت نسبة الأكسجين فى الغلاف الجوى أقل من النسبة الحالية . ونتيجة لذلك ، كان الحديد أسهل فى الذوبان ، حيث نُقِل الحديد الذائب إلى البحر وترسّب .

6. المادة العضوية مصدر للفحم والنفط والغاز

تتكون الصخور الرسوبية العضوية **organic sedimentary rocks** كليا أو جزئيا من رواسب عضوية غنية بالكربون، تكونت نتيجة تحلل مكونات الكائنات التى كانت حية يوما ما ثم دفنت . والفحم عبارة عن صخر رسوبى تكوّن بطريقة كيميائية حيوية . وهو يتكون من كربون عضوى تكوّن نتيجة عمليات ما بعد الترسيب (الدفن) لنباتات المستنقعات .

والزيت الخام crude oil والغاز الطبيعى natural gas هى سوائل وغازات لاتصنف عادة مع الصخور الرسوبية ، ولكن يمكن اعتبارها رواسب عضوية لأنها تتكون نتيجة عمليات ما بعد الترسيب لمادة عضوية فى مسام الصخور الرسوبية . ويؤدى الدفن العميق للمادة العضوية والمترسبة أصلا مع رواسب غير عضوية لتحولها إلى سائل يهاجر إلى صخور أخرى مسامية ، حيث يُحبس فيها ويُمنع من الوصول إلى سطح الأرض لوجود طبقة غير مسامية تقع فوق الطبقة الحاوية له . وغالبا مايتواجد النفط والغاز فى صخور الحجر الرملى لمساميتها ونفاذيتها العالية ، وأيضا الحجر الجيرى لاحتوائه على شروخ وفواصل .

IV. التراكيب الرسوبية

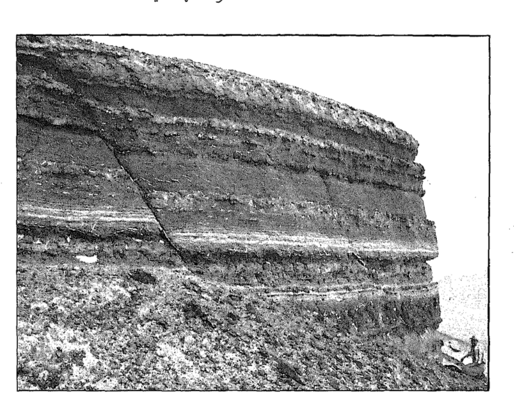
تتكون كثير من التراكيب والتى يطلق عليها التراكيب الرسوبية **sedimentary structures** ، والتى تعرف أيضا بالتراكيب الرسوبية الأولية primary sedimentary structures أثناء ترسيب الصخور الرسوبية أو بعد ترسيبها بفترة قصيرة . وترجع أهمية هذه التراكيب إلى أنها تمد الجيولوجيين بالأدلة عن كيفية نقل الراسب ، ومكان أو بيئة ترسيبه . كما تساعد التراكيب الرسوبية فى تحديد التتابع الاستراتجرافى الصحيح للطبقات، حيث توجد أقدم طبقة عند قاع التتابع ، وتكون الأحدث لأعلى عند قمته. ويساعد تحديد التتابع الاستراتجرافى فى استنتاج

وضع الصخور التى تصدعت أو طويت فى المناطق النشطة تكتونيا .

ونعرض فيما يلى وصفا لبعض هذه التراكيب :

أ. التطبق

يعتبر التطبق **bedding** أو**stratification** صفة أو سمة مميزة للرواسب والصخور الرسوبية (شكل 15.7) . وتدل الطبقات strata (مفردها طبقة stratum) المتوازية والمكونة من حبيبات مختلفة الحجم التطبق . وقد يؤدى توقف الترسيب إلى التطبق أيضا ؛ حيث إن المادة الجديدة لا تكون مثل المادة القديمة تماما. وقد تكون الطبقات رقيقة ، حين يكون سمكها سنتيمترات أو ميلليمترات وتسمى رقائق laminae ، بينما قد يصل سمك الطبقات إلى أمتار . ويعكس سمك الطبقة استمرار عملية الترسيب . وعادة ما تكون الرواسب أفقية التطبق، إلا أن الصخور الرسوبية تحتوى أيضا على أنواع أخرى عديدة من التطبق ، والتى لا تكون كلها أفقية .



شكل (**15.7**): التطبق **bedding** فى صخور من الطفل المتغير اللون **variegated shale** ، وهو من الصفات المهمة فى الصخور الرسوبية. لاحظ وجود صدع عادى **normal fault** (يسار الشكل) يقطع طبقات الصخور الرسوبية . جبل الدست ، الواحات البحرية - الصحراء الغربية - مصر . (د. ضياء الدين محمد كامل - قسم الجيولوجيا - جامعة الأزهر) .

أو التركيب ، على وجود أسطح ترسيب متتالية تكونت وقت الترسيب . وتفصل الطبقات أسطح التطبق **bedding planes** ، وهى أسطح منبسطة ، تميل الصخور أن تنفصل على امتدادها . ويؤدى التغير فى حجم الحبيبات أو تركيب الراسب إلى نشأة أسطح

ب. التطبق المتقاطع

يتكون التطبق المتقاطع **cross-bedding** من مجموعات من الطبقات المائلة الرقيقة (الرقائق) داخل طبقة صخرية أكبر (شكل 16.7) ، والتى ترسبت بواسطة الرياح أو المياه ، وتميل هذه الرقائق بزاويا قد



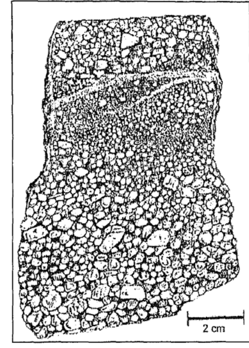
شكل (16.7): التطبق المتقاطع cross-bedding ، حيث تعكس الاتجاهات المختلفة للتطبق المتقاطع فى الحجر الرملى التغيرات فى اتجاه التيارات وقت الترسيب . (الواحات البحرية ، الصحراء الغربية - مصر) . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية) .

تصل إلى 35° عن الأفقى . ويتكون هذا النوع من التطبق حينما تترسب الحبيبات بواسطة الرياح على المنحدرات الحادة للكثبان الرملية على اليابسة أو فى الحواجز الرملية فى الأنهار وعلى قاع المحيطات أو فى الدلتاوات عند مصبات الأنهار . ويشيع التطبق المتقاطع فى الحجر الرملى ، كما يتواجد أيضاً فى الجرول وبعض الرواسب الكربوناتية. وتجدر الإشارة إلى أن التطبق المتقاطع يكون ظاهرا فى الحجر الرملى عنه فى الرمال المفككة .

جـ . التطبق المتدرج

يتمثل التطبق المتدرج **graded bedding** فى أن الحبيبات خشنة التحبب تتواجد عند قاعدة الطبقة ، ثم يقل حجم الحبيبات تدريجيا كلما اتجهنا إلى أعلى الطبقة (شكل 17.7) . ويعكس هذا التدرج فى حجم الحبيبات تضاؤل سرعة التيار الذى أدى إلى الترسيب . ويتراوح سمك الطبقة المتدرجة والتى تحتوى على مجموعة واحدة من الطبقات الخشنة إلى الدقيقة من عدة سنتيمترات إلى عدة أمتار. وتترسب مجموعات

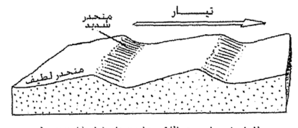
الطبقات المتدرجة التى قد يبلغ سمكها الكلى عدة مئات من الأمتار فى مياه المحيط العميقة بواسطة تيارات العكر turbidity currents التى تتحرك على قاع المحيط . ويساعد التطبق المتدرج فى تعرف الطبقات المقلوبة .



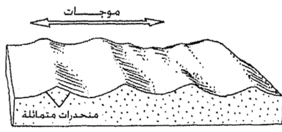
شكل (17.7): التطبق المتدرج graded bedding فى كونجلومرات ، ولاية تنسى الأمريكية، حيث تتركز الحبيبات الخشنة عند قاع الطبقة ويتدرج حجم حبيبات الجرول gravel تدريجيا كلما اتجهنا إلى أعلى الطبقة .

د. علامات النيم

علامات النيم ripple marks عبارة عن كثبان صغيرة جدا من الرمل أو الغرين تنشأ على سطح الطبقات الرسوبية بحيث يكون امتدادها الطويل متعامدا على اتجاه التيار. وتتكون من سلسلة من التلال أو التموجات المنخفضة والضيقة التى قد يصل ارتفاعها إلى سنتيمتر أو اثنين تفصلها قيعان أكثر اتساعا. وتتواجد هذه العلامات على أسطح الرمال الحديثة ، كما تتواجد أيضا على أسطح طبقات الحجر الرملى القديم (شكل 10.1) . وكما أسلفنا فإنها تُرى على أسطح الكثبان المتكونة من تذرية الرياح أو فى الحواجز الرملية تحت الماء فى مجارى المياه الضحلة أو تحت الأمواج الشاطئية . ويمكن التمييز بين علامات النيم المتماثلة symmetrical ripples وتسمى أيضا بعلامات نيم التأرجح oscillation ripples، والتى تنشأ بفعل حركة الأمواج السطحية جيئة وذهابا على الشاطئ ، وبين علامات النيم غير المتماثلة asymmetrical ripples والتى تتكون من التيارات التى تتحرك فى اتجاه واحد فوق حواجز رملية فى النهر ، أو كثبان رملية تكوّنها الرياح (شكل 18.7) . ويشير وجود هذه العلامات فى الصخور الصلبة إلى اتجاه حركة الرياح أو تيارات الماء القديمة .



Asymmetrical ripple marks - علامات نيم غير متماثلة



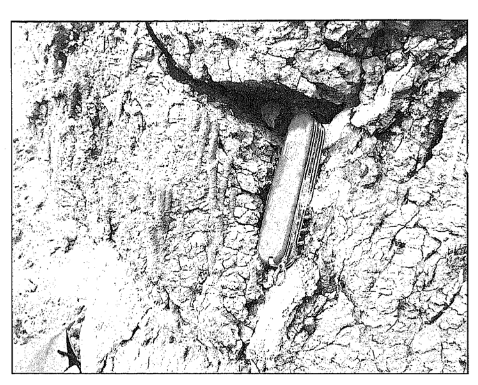
Symmetrical ripple marks - علامات نيم متماثلة

شكل (18.7): أشكال النيم على رمال الشاطئ
تكون التموجات متماثلة symmetrical عندما تكون حركة الأمواج إلى الأمام والخلف ، بينما تكون التموجات غير متماثلة asymmetrical عندما تكون حركة التيار فى اتجاه واحد .

هـ. تراكيب التقليب الحيوى (الاضطراب الحيوى)

ينشأ تركيب التقليب الحيوى (الاضطراب الحيوى) bioturbation حينما تقوم الكائنات الحية مثل الديدان وغيرها بحفر مسالك أو أنفاق لها فى طين ورمال رواسب قاع البحر . ويترتب على ذلك تغير فى شكل أسطح الطباقية فى عديد من الصخور الرسوبية، كما قد تخترق تلك الأنابيب الأسطوانية التى قد يبلغ

قطرها عدة سنتيمترات أسطح الطباقية ، وتمتد رأسياً خلال عدة طبقات (شكل 19.7). وتتغذى هذه الكائنات الحيه على الرواسب حيث أنها تحتوى على قدر ضئيل من المواد العضوية وتخلف وراءها الرواسب التى تملأ تلك المسالك. وتستخدم تلك التراكيب فى تعرف سلوك الكائنات الحية التى قامت الطين فى رواسب قيعان البحيرات عندما تجف ، أو فى رواسب الفيضان عندما ينخفض مستوى النهر . وقد يتصخر الطين المتشقق ليكوّن صخر الطفل ، الذى يحتفظ بالشقوق التى قد تملؤها الرمال الناعمة التى تذروها الرياح . كما تتميز أسطح الطين والرمال الناعمة بطبعات المطر rain prints (شكل 20.7ب).



شكل (19.7): تراكيب التقليب الحيوى bioturbation حيث تحفر الكائنات الحية مسالك لها فى الرواسب ، مما يؤدى إلى تكوين أنابيب أسطوانية تخترق أسطح الطباقية . جبل الدست ، الواحات البحرية ، الصحراء الغربية ، مصر . (د. ضياء الدين محمد كامل . قسم الجيولوجيا – جامعة الأزهر) .

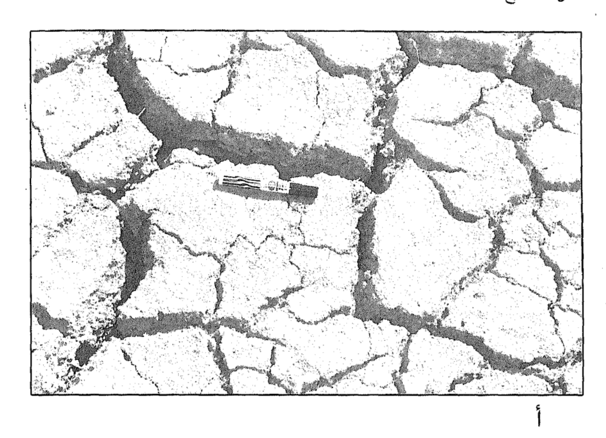
بحفر المسالك خلال الرواسب ، وبالتالى إعادة بناء البيئة الرسوبية .

و. تشققات الطين

تشققات الطين **mud cracks** هى نمط مضلع من التشققات ، ينشأ فى الرواسب دقيقة الحبيبات من تناوب فترات المطر الخفيف والجفاف (شكل 20.7 أ) . ويحدث تشقق الطين أثناء فترات الجفاف . وحيث إن الجفاف يتطلب وجود الهواء ، لذلك تتكون تشققات

ز. التتابعات الطبقية

التتابعات الطبقية**bedding sequences** هى أنماط لتتابعات متداخلة interbedding مع بعضها بعضا من الحجر الرملى والطفل وأنواع أخرى من الصخور الرسوبية. وتساعد طبيعة هذه التتابعات الطبقية فى استنتاج البيئات التى تكونت فيها هذه الرواسب. ويوضح شكل (21.7) دورة طمية ، وهى دورة من تتابعات طبقية كوّنتها الأنهار . ويرسب النهر

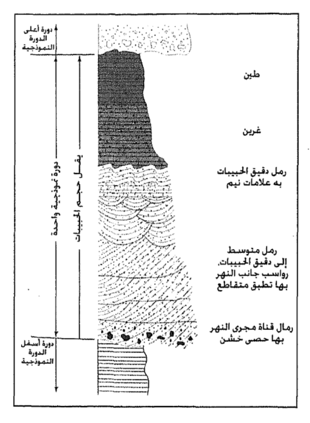


أ



ب

شكل (20.7): أ. تراكيب تشققات الطين mud cracks ، جبل أذن برأس الخيمة – دولة الإمارات العربية المتحدة . (أ.د. أحمد عبد العزيز الكيار ، قسم الجيولوجيا – جامعة القاهرة) ب. طبعات المطر rain prints ، وهى حفر صغيرة ضحلة لها حواف مرتفعة تتكون نتيجة سقوط قطرات المطر على سطح شقف من الطين – الواحات الخارجة – مصر . (مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان ، قسم الجيولوجيا – جامعة عين شمس).



شكل (21.7): دورة طمية نموذجية ، حيث يتراوح سمك الدورة بين بضعة أمتار للمجارى المائية الصغيرة حتى أكثر من 20 مترا للمجارى المائية الكبيرة .

دورات متكررة من التتابعات الطبقية ، والتى تتدرج فيها الرواسب عند القاعدة من طبقات خشنة الحبيبات ذات تطبق متقاطع كبير إلى طبقات أدق فى حجم الحبيبات ذات تطبق متقاطع صغير ، ثم إلى طبقات أفقية عند القمة . وتتكون هذه الرواسب عند حركة النهر جانبيا على قاع الوادى . كما يمكن استخدام تتابعات طبقية مميزة أخرى لمعرفة ظروف الترسيب عند خط الشاطئ وفى البحر العميق (وستناقش هذه التتابعات فى الفصل التاسع) .

وترتبط التراكيب الرسوبية ببيئات الترسيب التى تكونت فيها . فالشكل الهندسى للتطبق المتقاطع فى رمال الصحراء يعكس الاتجاه السائد للرياح أثناء الترسيب ، بينما يقتصر وجود التطبق المتدرج على رواسب المنحدر القارى والبحر العميق . حيث يتم الترسيب بنوع خاص من تيارات القاع يسمى تيارات العكر. ولا يتواجد التطبق المتدرج تقريباً فى بيئات خط الشاطئ الضحل .

V. بيئات الترسيب والسحنات الرسوبية

تعرف بيئة الترسيب **depositional environment** بأنها منطقة من الأرض محددة جغرافيا ، تتميز بوجود مجموعة من العمليات الجيولوجية والظروف البيئية المميزة لها. وتتضمن هذه الظروف البيئية:

- نوع وكمية الماء سواءً كانت فى محيط أو بحيرة أو نهر أو أرض قاحلة جافة.
- التضاريس ، سواءً كانت أراضٍ واطئة أى منخفضة lowland أو جبالاً أو سهول ساحلية

coastal plains أو محيطات قليلة العمق أو محيطات عميقة .

• النشاط الحيوى .

وتشمل العمليات الجيولوجية المؤثرة على بيئة الترسيب طبيعة التيارات التى تنقل وترسب الرواسب مثل الماء أو الريح أو الجليد ، والأوضاع التكونية التى قد تؤثر على الترسيب ودفن الرواسب ، ووجود نشاط بركانى . وهكذا، فإن البيئة الشاطئية مثلاً ، تجمع بين ديناميكية الأمواج التى تقترب وتتكسر على الشاطئ والتيارات الناتجة عنها وتوزيع الرواسب على الشاطئ .

وترتبط بيئات الترسيب بكل من تكتونية الألواح والمناخ ؛ حيث ترتبط رواسب الطمى السميكة بالجبال المتكونة نتيجة تصادم القارات ، كما توجد الخنادق العميقة فى المحيطات عند نطاقات الاندساس. وتوجد بيئات ترسيب الطمى أيضا على امتداد حواف وديان الخسف rift valleys فوق القارات . أما بالنسبة للمناخ فإن بيئة الصحراء تحتم وجود مناخ جاف قاحل ، بينما تحتاج البيئة الجليدية لمناخ بارد .

ويجب التنويه إلى أن بيئة الترسيب قد تكون موضعا للترسيب أو موضعا للتعرية . ويمكن القول بصفة عامة أن البيئات القارية (تحت الهوائية) تعد نموذجا لمناطق تسودها عمليات التعرية أساسا ، بينما تمثل البيئات البحرية (تحتمائية) نموذجا لمناطق تسودها غالبا عمليات الترسيب. وهناك أيضا بعض البيئات الانتقالية التى تتحول من التعرية إلى الترسيب خلال فترة زمنية واحدة ، مثل بيئة وديان الأنهار.

وقد كان تأثير الإنسان شديدا فى بعض البيئات . حيث قام ببناء حواجز لصد الأمواج وحماية الشواطئ ، مما أدى إلى تغير شكل الشواطئ كثيرا. كما تغيرت البيئات الجافة القاحلة إلى بيئات رطبة فى داخل وحول بعض المدن مثل بعض مدن المملكة العربية السعودية ، بسبب نقل المياه أو تحليتها لاستخدامها فى زراعة الصحراء. كما قد تتوسع البيئات الصحراوية لتضم بيئات مجاورة لها أقل جفافا. كما قد تتغير بيئات المجارى المائية بسبب إنشاء السدود أو شق القنوات الصناعية . وقد يتغير التركيب الكيميائى للمياه فى البحيرات وشواطئ المحيطات نتيجة صرف المياه الملوثة فيها .

وتصنف بيئات الترسيب إلى بيئات قارية تقع فوق القارة ، وبيئات خط الشاطئ وتقع بالقرب من الشواطئ ، وبيئات بحرية وتقع فى المحيطات (شكل 22.7 وجدول 4.7).

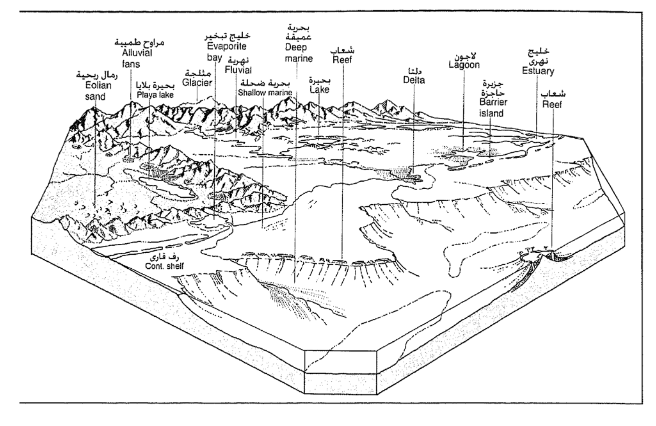
وفيما يلى وصف لهذه البيئات:

أ. البيئات القارية

تتنوع بيئات الترسيب التى توجد على القارات ، بتنوع درجات الحرارة وهطول الأمطار على سطح الأرض . وتتواجد البيئات القارية continental environments (تعرف أيضا بالبيئات الأرضية terrestrial environments) حول الأنهار وفى الصحارى والبحيرات والمثالج .

وفيما يلى وصف مختصر لأنواع البيئات القارية المختلفة:

1 – البيئة النهرية fluvial environment وتعرف أيضا بالبيئة الطميية alluvial environment ، وتشمل مجرى النهر وحوافه ومسطح الوادى على جانبيه ، والذى يتغطى بالماء أثناء الفيضان . وحيث إن الأنهار توجد دائما على القارات ، فإن الرواسب الطميية تنتشر على القارات . وتتواجد الكائنات الحية بوفرة فى رواسب الفيضان الطينية ، مما يؤدى إلى تكوّن الرواسب العضوية . وتتراوح المناخات من الجاف إلى الرطب .



شكل (22.7): بيئات الترسيب الحديثة .

2 - البيئة الصحراوية desert environment وهى بيئة جافة وقاحلة . وتتكون الرواسب فى هذه البيئة بفعل الرياح ، بالإضافة لعمل الأنهار التى تفيض موسميا . وحيث إن المناخ الجاف القاحل يقلل من نمو الكائنات الحية ، فإن تأثيرها يكون محدودا على الرواسب التى تتكون فى هذه البيئة . وتشير الكثبان الرملية إلى بيئة رملية خاصة .

وتشمل البيئة الصحراوية بالإضافة للكثبان الرملية بحيرات البلايا والمراوح الطمية . أما بحيرات البلايا playa lakes فهى بحيرات دائمة أو مؤقتة تشغل الوديان أو الأحواض الجافة (القاحلة) ، وعندما يتبخر ماؤها تصبح بلايا playas ، وهى طبقات مسطحة من الصلصال تغطيها أحيانا قشرة من الأملاح . أما المروحة الطمية alluvial fan فهى عبارة عن جسم من الرواسب الطمية التى تشبه المروحة ، وتتكون عندما ينساب مجرى مائى فى وادٍ شديد الانحدار يتحول فجأة إلى سهل طميى أو وادٍ مستو القاع، مما يؤدى إلى حدوث الترسيب .

3- بيئة البحيرات lake environment وهى بيئة تتحكم فيها تيارات المياه العذبة أو المالحة، الضعيفة أو المتوسطة القوة داخل البحيرة . وقد تكون بحيرات المياه العذبة أماكن للترسيب الكيميائى لمواد عضوية وكربونات . أما البحيرات المالحة ، مثل تلك التى توجد فى الصحراء ، فإنها تتبخر وترسب مجموعة متنوعة من معادن المتبخرات مثل الهاليت والجبس .

4- البيئة الجليدية glacial environment وهى بيئة تتأثر بديناميكية حركة كتل الجليد ، كما تتميز بالمناخ البارد ووجود الحياة النباتية والتى يكون تأثيرها محدود على الرواسب التى تتكون فيها . كما تتكون عند الحافة المنصهرة للمثلجة بيئة طميية انتقالية فى مجارى الماء المنصهر .

ب. بيئات خط الشاطئ

تتميز بيئات خط الشاطئ shoreline environments بضحالتها وسيادة نشاط الأمواج، وحركات المد والجزر ، وكذلك تأثير التيارات على الشواطئ الرملية . وقد تتواجد الكائنات الحية بوفرة فى هذه المياه ، ولكن لا تؤثر هذه الكائنات على ترسيب المواد الفتاتية إلا فى المناطق التى توجد بها رواسب الكربونات بوفرة . وتتضمن بيئات خط الشاطئ:

1 - بيئة الدلتا deltaic environment وتكون عند التقاء الأنهار بالبحيرات أو البحار.

2- بيئة مسطح المد والجزر tidal flat environment حيث تسود تيارات المد والجزر مساحات واسعة مكشوفة فى وقت الجزر .

3 - بيئة الشاطئ beach environment وتتميز بنشاط الأمواج القوية التى تقترب من الشاطئ وتتكسر عليه ، وتعمل على توزيع الرواسب على الشاطئ . وتترسب فى هذه البيئات أشرطة من الرمل والحصى بفعل الأمواج .

4 - بيئة الخليج النهرى (مصب النهر) estuary ، وهى البيئة التى تنشأ عند مصب النهر. وتتكون هذه البيئة فى المناطق الضحلة القريبة من الشاطئ ، حيث يوجد مسطح مائى مغلق يصب فيه نهر ، يعمل على تخفيض درجة ملوحة الماء داخل المسطح المائى بشكل تدريجى .

5 - بيئة البحيرات الشاطئية (اللاجون) ، حيث يتكون اللاجون lagoon من منطقة مستطيلة ضحلة من البحر ، تنفصل عنه بجزر حاجزة barrier islands .

جدول (4.7): بيئات وعوامل الترسيب وأنواع الرواسب المميزة لكل منها .

البيئة	عامل النقل والترسيب	الرواسب
قارية **Continental**		
نهرية (طميية) Fluvial	أنهار	رمل وجرول وطين
صحراوية Desert	رياح	رمل وتراب
بحيرية Lake	تيار بحيرات وأمواج	رمل وطين ومواد عضوية ومتبخرات
جليدية Glacial	جليد	رمل وجرول وطين
خط الشاطئ **Shoreline**		
دلتاوية Deltaic	نهر + أمواج ومد وجزر	رمل وطين
مسطحات المد والجزر Tidal flats	تيارات المد والجزر	رمل وطين
شاطئية Beach	أمواج ومد وجزر	رمل وجرول
خليج نهرى Estuary	أنهار وأمواج	رمل وطين
بحيرات شاطئية (لاجون) Lagoon	أمواج	رمل وطين ومتبخرات

(يتبع) :

البيئة	عامل النقل والترسيب	الرواسب
بحرية Marine		
رف قارى Continental shelf	أمواج ومد وجزر	رمل وطين
حافة قارية Continental margin	تيارات محيط	طين ورمل
الشعاب العضوية organic reefs	الكائنات الهيكلية وبعض الطحالب	شعاب وتراكيب كربوناتية ورمال جيرية
بحر عميق Deep sea	تيارات محيط وترسيب	طين

جـ- البيئات البحرية

تشمل البيئات البحرية marine environments عددا من البيئات الأصغر subenvironments . وتصنف البيئات البحرية عادة على أساس عمق المياه ، كما تقسم أيضا بناءً على المسافة التى تفصلها عن اليابسة إلى البيئات التالية:

1- بيئات الرف القارى continental shelf environments وتوجد فى المياه الضحلة البعيدة عن الشواطئ القارية ، حيث تتحكم التيارات المعتدلة نسبياً فى عملية الترسيب. وقد تتكون رواسب فتاتية عند وجود مصدر للفتاتيات ، أو كيميائية عند وجود كائنات حية ذات هيكل جيرى، أو متبخرات عند وجود بخر كثيف للماء .

2- بيئات الحافة القارية continental margin environments وتوجد فى المياه العميقة عند حواف القارات ،حيث تتكون الرواسب بفعل تيارات التعكير turbidity currents.

3- الشعاب العضوية organic reefs وتتكون من تراكيب كربوناتية قامت ببنائها الكائنات الحية التى تفرز الكربونات ، على الرفوف القارية أو على الجزر المحيطية البركانية .

4- بيئات البحر العميق deep-sea environments وتضم كل قيعان المحيطات العميقة البعيدة عن القارات ، حيث تعكر تيارات المحيط أحيانا المياه الهادئة . وتضم هذه البيئات الخنادق العميقة deep trenches فى المحيطات، والتى تتواجد عند نطاقات الاندساس ، وحيود وسط المحيط mid – ocean ridges والتى تقع فوق حدود الألواح المتباعدة ، وسهول الأعماق المسطحة abyssal plains ، التى تكونت نتيجة تيارات التعكير التى تحركت بعيدا عن حواف القارات.

ويشير تعدد البيئات المتواجدة على سطح اليابسة إلى أن هناك عددًا لا نهاية له من بيئات الترسيب ، ولكن ليس هناك بيئتان متماثلتان تماما ، كما تتداخل البيئات المختلفة مع بعضها البعض فوق سطح الأرض .

د. السحنات الرسوبية : تواجد مجموعة من البيئات الرسوبية مع بعضها بعضا

تعكس التتابعات الطبقية الرأسية التغير فى ظروف الترسيب عبر الزمن ، بينما يعكس التغير الأفقى فى مكونات الطبقة الواحدة التغير فى بيئات الترسيب القديمة من موضع لآخر فى الزمن نفسه. فعلى سبيل المثال : تترسب الرمال الخشنة قرب الشاطئ ، ويقل حجم الحبيبات كلما اتجهنا بعيدا عنه ، كما تترسب الرواسب الكربوناتية فى الأعماق الأكبر. وهكذا تترسب رواسب مختلفة النوعية ، ولكنها متجاورة فى وقت واحد (شكل 23.7). وتتميز كل وحدة من هذه الوحدات بمجموعة من الخصائص التى تعكس

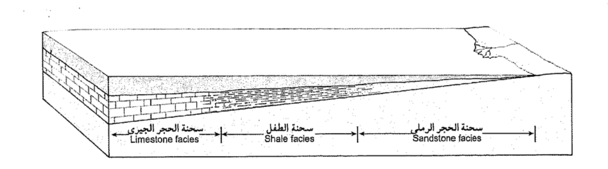
ظروف الترسيب ، ويستخدم مصطلح سحنات facies لوصف تلك المجموعات من الرواسب .

ويمكن تعريف السحنة الرسوبية sedimentary facies بأنها مجموعة الخصائص الصخرية والحيوية التى تميز أى راسب موجود فى جزء محدود المساحة من وحدة رسوبية ، ويمكن تمييزه عن خصائص غيره من الرواسب المزامنة له ، التى ترسبت فى بيئة رسوبية

وعلى هذا الأساس ، تصنف بيئات الترسيب عامة إلى مجموعتين رئيسيتين ، هما: بيئات الترسيب الفتاتية ، وبيئات الترسيب الكيميائية والكيمائية الحيوية .

VI. الترسيب وتكتونية الألواح

تأتى الطاقة المؤثرة فى عملية الترسيب أساساً ، من مصدرين رئيسيين هما حرارة الأرض الداخلية



شكل (23.7): عند تتبع طبقة رسوبية جانبيا نجد أنها تتكون من أنواع مختلفة من الصخور ، ويرجع ذلك إلى وجود أنواع عديدة من بيئات الترسيب على امتداد منطقة أفقية فى الوقت نفسه . ويستخدم مصطلح "سحنة facies " لوصف هذه المجموعات من الصخور الرسوبية . وتتغير كل سحنة إلى الأخرى جانبيا بشكل تدريجى .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York) .

مختلفة . وتتميز السحنة بمجموعة من الخصائص مثل : حجم الحبيبات وشكلها ، ولون الصخر وتركيبه المعدنى والكيميائى ، والتراكيب الرسوبية ، والمحتوى الحفرى .

وتتميز بيئات الترسيب بأنواع السحنات المتواجدة بها. فتكون معظم رواسب البيئات النهرية (الطميية) فتاتية ، بينما تكون معظم رواسب الشعاب المرجانية وبيئات الرصيف القارى الكربوناتى ضحلة العمق رواسب كيميائية وكيميائية حيوية. ولذلك ، فإن بعض الجيولوجيين يقسمون البيئات الرسوبية طبقا للمجموعة السائدة فى الترسيب .

والشمس . وتعمل الطاقة الحرارية الداخلية فى الأرض، والتى تعتبر المصدر الأساسى للطاقة فى تكتونية الألواح ، على تحريك الغلاف الصخرى وكذلك رفع الأرض . وينتقل الراسب الناتج عن عملية تجوية وتعرية الصخور الموجودة فى المناطق العالية عبر المنحدرات إلى البحر ، ثم فى النهاية إلى المحيط تحت تأثير الجاذبية الأرضية . وتعتبر المجارى المائية والمثالج وأمواج وتيارات المحيط عوامل نقل رئيسية للرواسب، وهى جزء من الدورة المائية التى تستمد طاقتها من الإشعاع الشمسى.

وتكون معدلات الترسيب عالية بالقرب من المناطق العالية والنشطة تكتونيا ، بينما تقل هذه المعدلات كثيرا فى المناطق الداخلية من القارات الثابتة نسبيا ، كما تكون أقل كثيرا فى البحار العميقة التى تكون بعيدة عن مصادر الرواسب الأرضية. وفى المناطق النشطة تكتونيا، تزيد معدلات الرفع عن معدلات التعرية ، مما يجعل سلاسل الجبال المرتفعة ملامح بارزة على سطح الأرض . وتوضح الصخور الرسوبية البحرية المنكشفة عند قمة جبل إفرست فى سلسلة جبال الهيمالايا أن هذه الرواسب رفعت نحو 9 كم على الأقل بعد ترسبها منذ نحو 100 مليون سنة مضت فى بحر ضحل . وهذا يؤكد أن الرواسب القديمة التى ترسبت على قاع المحيط قد تحولت إلى صخور أضيفت إلى القارة ورفعتها القوى التكتونية.

وتوجد تراكمات طبقية سميكة للغاية فى مواضع تكتونيه معينة على الألواح ، فيؤدى مثلا انشطار القارات عند مراكز الانتشار (الحدود المتباعدة) إلى تراكم أوتاد رسوبية sedimentary wedges على امتداد الحواف القارية الجديدة نتيجة نقل الرواسب بواسطة المجارى المائية إلى حوض المحيط المستمر فى النمو والتزايد . وتمثل حافة المحيط الأطلنطى عند أمريكا الشمالية مثالا لهذه العملية (شكل 24.7أ) . ويتكون جزء كبير من الطبقات السميكة المتراكمة تحت الرف القارى من صخور رسوبية بحرية ضحلة ؛ مما يدل على أن هذا الوتد الرسوبى قد هبط ببطء أثناء عملية التراكم.

كما قد تتراكم الرواسب بالمجارى المائية من سلسلة جبال صاعدة فى أحواض ترسيب مجاورة لنطاقات تصادم القارات continental collision zones (شكل 24.7 ب). وتمثل سلسلة قوس جبال الهيمالايا- هندوكوش Himalaya-Hindu Kush mountain arc فى جنوب ووسط آسيا مثالا واضحا لذلك.

شكل (24.7): الرواسب وتكتونية الألواح ، أمثلة لتراكمات سميكة من الرواسب فى مواضع تكتونية مختلفة من الألواح :

(أ) يتراكم وتد سميك من الرواسى ببطء على امتداد حافة قارية جديدة تكونت نتيجة انشطار قارة عند مركز انتشار spreading center حيث تباعدت كتلتان قاريتان .

(ب) فى نطاق تصادم قارى continental collision zone ، يتراكم الراسب من سلسلة جبال صاعدة ليكون وتدا سميكا

(جـ) يتساقط الراسب فى خندق بحرى عميق من قارة مجاورة ، يحدها قوس من براكين نشطة ليكوّن وتدا من الرواسب ، يحشر ويسحق أثناء اندساس لوح محيطى .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتساقط الرواسب فى الخنادق المحيطية العميقة على امتداد نطاقات الاندساس subduction zones النشطة بالقرب من الحواف القارية وتتراكم بمعدلات عالية لتتكون تتابعات سميكة ، كما هو الحال على امتداد الحافة الغربية لأمريكا الجنوبية (شكل 24.7 ج). وتشمل الرواسب الفتاتية المتراكمة نسبة عالية من الفتات البركانى ، حيث تكون البراكين عادة مصاحبة لتلك الأحزمة التكتونية. وعندما يقترب اللوح المحيطى ببطء من الحافة القارية ، تحشر الرواسب وتسحق على امتداد القارة وتصبح جزءًا من القارة. ويعاد تدوير الرواسب بهذه الطريقة من القارة إلى المحيط ، ثم مرة أخرى إلى القارة ، حيث يسبب الرفع المستمر بدء العملية من جديد وتكرار هذه الدورة .

الملخص

1. تتكون الرواسب من الحبيبات الفتاتية والأيونات الذائبة نتيجة عمليات التجوية الطبيعية والكيميائية والتعرية. وتحمل تيارات الماء والرياح والجليد هذه المواد إلى مكان استقرارها النهائى حيث موقع الترسيب . وينتج الترسيب ، الذى هو عبارة عن هبوط الحبيبات واستقرارها من الوسط الناقل ، لتكوّن رواسب طباقية فى مجارى مياه الأنهار والوديان ، وعلى الكثبان الرملية وعند حواف وقيعان المحيطات .
2. تؤدى عمليات ما بعد الترسيب ، وخاصة عمليات التصخر إلى تصلد الرواسب وتحولها إلى صخور رسوبية بعد أن تدفن تحت رواسب إضافية .
3. تنقسم الرواسب والصخور الرسوبية إلى قسمين رئيسيين ، هما : الرواسب الفتاتية ، والرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية.
4. تتكون الرواسب الفتاتية من فتات الصخور الأصلية التى تعرضت للتجوية الطبيعية (الفيزيائية)، بينما تتكون معادن الصلصال بالتجوية الكيميائية. وتحمل تيارات المياه والرياح والجليد تلك النواتج الصلبة إلى المحيطات ، وأحيانا لا تصل إلى المحيط وإنما تترسب خلال مسار انتقالها .
5. تتكون الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية من الأيونات الذائبة فى الماء أثناء التجوية الكيميائية. وتنقل هذه الأيونات فى المحاليل إلى المحيطات وتختلط مع ماء البحر ؛ حيث تترسب نتيجة للتفاعلات الكيميائية والكيميائية الحيوية .
6. تصنف الرواسب والصخور الرسوبية الفتاتية طبقا لحجم الحبيبات إلى جرول وكونجلومرات أو بريشيا ورمال وحجر رملى وطين وحجر طين وطفل. وتعكس هذه الطريقة فى تصنيف الرواسب أهمية قوة التيار أثناء نقل وترسيب المواد الصلبة .
7. تصنف الرواسب والصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية الحيوية على أساس تركيبها الكيميائى إلى أنواع عديدة أهمها صخور الكربونات والحجر الجيرى وحجر الدولوميت. ويتكون الحجر الجيرى فى معظمه من أصداف ترسبت بطريقة كيميائية حيوية . ويتكون حجر الدولوميت نتيجة تغيرات ما بعد الترسيب للحجر الجيرى . وتشمل الرواسب الكيميائية والكيميائية الحيوية أيضا المتبخرات والرواسب السيليكية (مثل التشرت) والفوسفوريت ومتكونات الحديد والخث ، بالإضافة إلى مواد عضوية أخرى تحولت إلى فحم ونفط وغاز .

8. تتكون التراكيب الرسوبية أثناء ترسيب أو بعد ترسيب الصخور الرسوبية بفترة قصيرة ، وتمدنا تلك التراكيب بأدلة تفسر كثيرًا من الظواهر الترسيبية والبيئية القديمة ، وهى تشمل التطبق والتطبق المتقاطع والتطبق المتدرج وعلامات النيم وتراكيب التقليب الحيوى وتشققات الطين والتتابعات الطبقية .

9. تصنف بيئات الترسيب إلى بيئات قارية وبيئات خط الشاطئ وبيئات بحرية .

10. تعرف السحنة الرسوبية بأنها مجموعة من الخصائص الصخرية والحيوية التى تميز أى راسب موجود فى جزء محدود من وحدة رسوبية تميزه عن غيره من الرواسب المتزامنة له والتى ترسبت فى بيئات رسوبية مختلفة فى الوحدة نفسها .

11. تكون معدلات الترسيب عالية بالقرب من المناطق المرتفعة والنشطة تكتونيا ، بينما تقل هذه المعدلات كثيرا فى المناطق الداخلية من القارات والثابتة تكتونيا ، كما تكون أقل كثيرا فى البحار العميقة ، والتى تكون بعيدة عن مصادر الرواسب الأرضية .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://walrus.wr.usgs.gov/seds/
http://www.isgs.uiuc.edu/dinos/dinos_home.html
http://www.kaibab.org/home.htm

المصطلحات المهمة

bedding (=stratification)	تطبق	mud cracks	تشققات الطين
biochemical sediment, rock	راسب أو صخر كيميائى أو حيوى	mudstone	حجر الطين
bioclastic particles	حبيبات فتاتية حيوية	oil	زيت
bioturbation	تقليب (اضطراب) حيوى	organic sediment, rock	راسب أو صخر رسوبى عضوى
boulder	جلمود (ج. جلاميد)	peat	خث (بيت)
carbonate platform	رصيف كربوناتى	pebbles	حصى
carbonate sediment, rock	راسب أو صخر كربوناتى	phosphorite	فوسفوريت
cementation	تلاحم	porosity	مسامية
chemical sediment, rock	راسب أو صخر كيميائى	recrystallization	إعادة التبلور
chert	تشرت	reefs	شعاب
clastic sediment, rock	راسب أو صخر فتاتى	ripple marks	علامات نيم
cobbles	حصى كبير	roundness	استدارة
compaction	كبس (اندماج)	sand	رمل
conglomerate	كونجلومرات	sandstone	حجر رملى
cross-bedding	تطبق متقاطع	sediment	راسب
depositional environment	بيئة الترسيب	sedimentary basin	حوض رسوبى
diagenesis	تغيرات مابعد الترسيب	sedimentary breccia	بريشيا رسوبية
dolostone	حجر الدولوميت	sedimentary environment	بيئة رسوبية
evaporite sediment, rock	راسب أو صخر رسوبى تبخرى	sedimentary facies	سحنة رسوبية
evaporites	متبخرات	sedimentary rock	صخر رسوبى
facies	سحنة	sedimentary structures	تراكيب رسوبية
flint	صوان	shale	طفل
Foraminifera	فورامينيفرا	silt	غرين
gas	غاز	siltstone	حجر الغرين
graded bedding	تطبق متدرج	sorting	الفرز
gypsum	جبس	stratification	تطبق
iron formation	متكوّن حديد	sphericity	تكور
limestone	حجر جيرى	stratum (pl. strata)	طبقة (ج. طبقات)
lithification	تصخر	subsidence	هبوط
marine evaporite sediment, rock	راسب أو صخر بحرى تبخرى	turbidites	عكاريات
marine evaporites	متبخرات بحرية	turbidity current	تيار العكر
mud	طين	well sorted	جيد الفرز

الأســئلة

1. كانت تجوية القارات أكثر انتشارا وشدة فى العشرة ملايين سنة الأخيرة من عمر الأرض عنها فى الفترات المبكرة من عمرها. كيف تنعكس هذه الملاحظة على الرواسب التى تغطى سطح الأرض الآن ؟
2. متى يعتبر الرماد البركانى المتساقط من الرواسب ؟
3. ورد فى أحد التقارير الجيولوجية أن الحجر الرملى بمنطقة ما قد استمد ونشأ من صخر الجرانيت . ما المعلومات التى تم جمعها لكى تؤدى إلى هذه النتيجة ؟
4. إذا كنت تنظر إلى قطاع فى حجر رملى به تطبق متقاطع. ما التركيب الرسوبى الذى يدلك على اتجاه التيار الذى أدى إلى ترسيب الحجر الرملى ؟
5. ما الظروف التى تؤدى إلى تكوّن التطبق فى الراسب أو الصخر الرسوبى؟
6. كيف يمكن التفرقة بين الراسب المتكون بواسطة المياه الجارية ، والراسب المتكون بواسطة الرياح أو فى بحيرة ؟
7. إذا كان هناك تتابع متطبق فى منطقة ما بها صخر كونجلومرات عند القاعدة ، يتدرج لأعلى إلى حجر رملى ثم إلى طفل فحجر جيرى مكوّن من رمل كربوناتى تلاحمت حبيباته بالجير . ما التغيرات التى حدثت فى منطقة الصخر المصدر أو بيئة الترسيب وتكون مسئولة عن ترسيب هذا التتابع ؟
8. فى تتابع من القاعدة للقمة ، يبدأ بحجر جيرى فتاتى عضوى متطبق ، يليه حجر جيرى مكوّن من كائنات عضوية متلاحمة بالجير ، تضم طحالب موجودة طبيعيا مع المرجان ، وينتهى بطبقات من الدولوميت . اذكر بيئات الترسيب التى أدت إلى تكوين هذا التتابع .
9. فى أى بيئات الترسيب نتوقع وجود الطين الجيرى؟
10. اذكر العمليات التى تؤدى إلى تحول الراسب إلى صخر رسوبى.
11. لماذا يعتقد أن البترول ينشأ من الرواسب البحرية؟
12. كيف يمكن استخدام حجم ودرجة فرز حبيبات الرواسب للتمييز بين الرواسب المتكونة فى بيئة جليدية ، وتلك المترسبة فى بيئة صحراوية ؟
13. صف رمال الشاطئ المتوقع وجودها نتيجة ضرب الأمواج لسلسلة من الجبال الشاطئية المكونة فى معظمها من البازلت.
14. ما الدور الذى تلعبه التيارات الناقلة فى نشأة بعض أنواع الحجر الجيرى؟
15. اذكر اسم الصخر الرسوبى الذى يتكون أساسا نتيجة عمليات ما بعد الترسيب ، والذى لا يوجد له مقابل كراسب أولى .
16. ما الأماكن التى يمكن أن توجد بها الشعاب ؟
17. إذا كان هناك شرم محيطى منفصل عن المحيط المفتوح وله مدخل ضحل . اذكر أنواع الرواسب التى يمكن أن تتكون على قاع الشرم ، إذا كان المناخ دافئًا جافًّا ، ونوعها إذا كان المناخ باردًا رطبًا .
18. ما أوجه التشابه بين كل من التشرت والحجر الجيرى من حيث النشأة ؟
19. اشرح أين نتوقع وجود تراكمات ضخمة بشكل استثنائى من الصخور الرسوبية ، ولماذا ؟

الفصل

8

الصخور المتحولة :
صخور جديدة من أخرى سابقة

I. حدود التحول

II. العوامل الطبيعية والكيميائية التى تتحكم فى عملية التحول :

أ . درجة الحرارة

ب . الضغط

جـ . التغيرات الكيميائية أثناء التحول

III. أنواع التحول :

أ . التحول الإقليمى

ب . التحول التماسى (الحرارى)

ج . التحول التهشمى

د . التحول الحرمائى

هـ . التحول بالدفن

IV. أنسجة التحول :

أ . الأنسجة المتو قة :

1. الاردواز 2. الفيليت

3. الشست 4. النيس

ب . الأنسجة غير المتورقة (الجرانوبلاستيتية) :

1. الهورنفلس 2. الكوارتزيت

3. الرخام 4. الأرجليت

5. الحجر الأخضر 6. الأمفيبوليت

7. الجرانيوليت 8. السربنتينيت

9. حجر الصابون

جـ . أنسجة البلورات الكبيرة (بورفيروبلاست)

د . أنسجة التشوه (الطحن)

V. التحول الإقليمى ورتبة التحول :

أ. أيزوجراد (خط تساوى رتبة التحول): عمل خرائط لنطاقات التحول

ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلى

ج. سحنات التحول

VI. نطاقات التحول بالتماس :

أ. هالات التحول (هالات التماس)

ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلى

VII. التحول وتكتونية الألواح

نشاهد فى حياتنا اليومية كيف تؤثر درجة الحرارة على المواد المختلفة . فاللحم المشوى يحتوى على مواد كيميائية مختلفة تماما عن تلك الموجودة فى اللحم النىء . كما أن الطهى فى قدور الضغط لا يؤثر على الطعام بالحرارة فقط ، ولكن بالضغط أيضا . وبطريقة مماثلة ، فإن درجات الحرارة والضغط المرتفعين فى أعماق القشرة الأرض تؤدى إلى تحول الصخور، ولكنها لا تكون مرتفعة بدرجة تكفى لانصهار الصخور.

ويؤدى الارتفاع فى درجات الحرارة والضغط والتغير فى البيئة الكيميائية إلى تغير التركيب المعدنى وأنسجة تبلور الصخور الرسوبية والنارية ، على الرغم من بقاء تلك الصخور فى الحالة الصلبة طوال عملية التحول ، وتسمى الصخور المتكونة **بالصخور المتحولة metamorphic rocks** . ويحدث التحول فى شكل الصخر ، بسبب حدوث تغيرات فى التركيب المعدنى أو النسيج أو التركيب الكيميائى أو فى الثلاثة معا . فمثلاً ، قد يتحول صخر الحجر الجيرى الغنى بالحفريات إلى صخر رخام أبيض لا يوجد به أى أثر للحفريات . وقد يبقى صخر ما مكون أصلاً من بلورات صغيرة من الكالسيت دون تغير فى التركيب المعدنى أو التركيب الكيميائى ، ولكن قد يحدث التغير فى النسيج بدرجة كبيرة حيث يتكون صخر به بلورات كبيرة متداخلة . وقد يتغير الطفل وهو صخر جيد التطبق دقيق التحبب لدرجة أنه لا يمكن رؤية حبيبات المعدن بالعين المجردة ، إلى شكل ينطمس فيه التطبق وتتكون بلورات كبيرة من الميكا تتلألأ فى ضوء الشمس . وفى هذا التحول ، يتغير التركيب المعدنى والنسيج كلية ، بينما يبقى التركيب الكيميائى العام للصخر دون تغير . وقد تتغير بعض الصخور من خلال تغير التركيب المعدنى والنسيج والتركيب الكيميائى ، حيث يحدث التغير بالحرارة والسوائل المستمدة من النشاط النارى . ويتناول هذا الفصل أسباب التحول وأنواعه ، وأصل الأنسجة المختلفة التى تميز الصخور المتحولة ، والعلاقة بين التحول وتكتونية الألواح .

أ- حدود التحول

قبل مناقشة عملية التحول بالتفصيل ، يتحتم أن نعين حدود عملية التحول . حيث يصف التحول التغيرات التى تحدث فى التركيب المعدنى ونسيج الصخور الرسوبية والمتحولة التى تعرضت لدرجات حرارة أعلى من 200 °م ، وضغوط أعلى من 300 ميجا باسكال (الضغط الناتج عن عدة آلاف من الأمتار بسبب الصخور التى تعلوها، ووحدة الضغط هى الباسكال Pa ، وللسهولة يستخدم أحيانا 1 مليون باسكال ـ ميجا باسكال أو Mpa كوحدة). ولا يشمل التحول التغيرات التى تحدث نتيجة التجوية أو عمليات ما بعد الترسيب diagenesis، لأن كلاً من التجوية وعمليات ما بعد الترسيب تحدث عند درجات حرارة أقل من 200° وضغط أقل من300 ميجاباسكال .

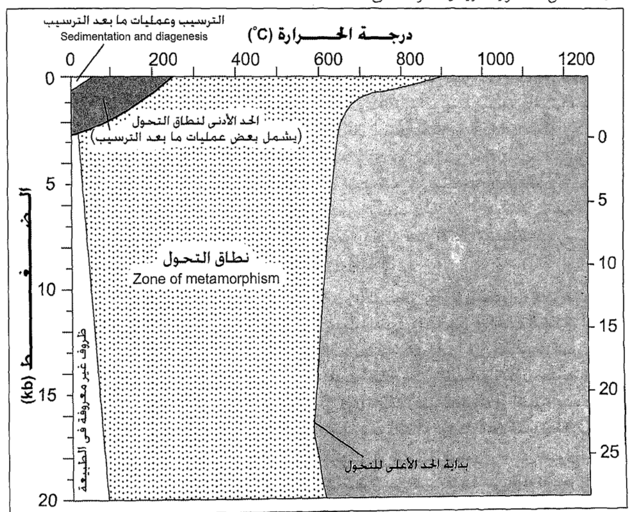
وهناك بالطبع حد أعلى للتحول ، يحتم ضرورة أن يحدث التحول والصخور فى الحالة الصلبة . أما إذا ارتفعت درجات الحرارة إلى مستويات أعلى ، فإنه يحدث انصهار جزئى للصخور وتكون صخور نارية. ويكون الحد الأعلى للتحول فى القشرة عند درجة حرارة نحو 900°م . ويمثل هذا الحد بداية الانصهار الجزئى الرطب للصخور ، حيث تحتوى معظم الصخور على كمية قليلة من الماء (شكل 1.8) . وتتحكم نوعية الصخور المنصهرة وكمية الماء فى درجة الحرارة التى يبدأ عندها الانصهار الجزئى ، وكذلك فى

كميـة الـصهارة التـى يمكـن أن تتكـون مـن الـصخر المتحول . ولذلك تبقى بعض أنواع الصخور فى الحالـة الصلبة عند 900° أو حتى أكثر ، وعندما توجـد كميـة صغيرة من الماء فإنه يحدث انصهار لكميـة صـغيرة مـن الصخور ، ويبقى الصهير محبوساً مثل جيـوب صـغيرة فى الصخر المتحول .

وعندما تتكون كميات كبـيرة مـن الـصهارة نتيجـة الانصهار الجزئى ، فإنهـا تـصعد إلى أعـلى وتتـداخل فى الصخور المتحولة التى تعلوها وتتصلب لتكوّن صـخرا ناريا متداخلا . ولذلك ، فإن الباثوليثـات المكونـة مـن صخر الجرانيت تتواجـد بجـوار أجـسام ضـخمة مـن الصخور المتحولـة والتـى تـرتبط معـا . وتوجـد هـذه التجمعات من الصخور النارية والمتحولـة عـلى امتـداد نطاقات الاندساس أو عند حـواف الألـواح التكتونيـة المتصادمة .

وهكـــذا ، يـــستخدم مـــصطلح **التحـــول metamorphism** (مشتق مـن meta بمعنـى تغـير وmorphe بمعنى شكل) لوصف كل التغيـرات التـى تحدث فى التركيب المعـدنى ونـسيج الـصخر وهمـا فى الحالة الـصلبة فى القـشرة الأرضـية ، بـسبب التغـير فى درجة الحرارة والضغط ، واللذان يكونان أعلى من تلك الموجودة عند السطح ، ولكنهما أقل من درجـة الحـرارة التى تنصهر عندها تلك الصخور.

وتضم المعادن السيليكاتية والتى تميـز التحـول ـ أى يدل وجودها عـلى أن الـصخر قـد تعـرض للتحـول ـ



شكل (1.8): رسم تخطيطى يوضح علاقة درجات الحرارة والضغط بحدود عملية التحول .

(Simplified after Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

ثلاثة معادن متعددة الشكل لسيليكات الألومنيوم (Al_2SiO_5) هي : الكيانيت والأندالوسيت والسيليمانيت ، بالإضافة إلى معادن البيروفيليت والاشتوروليت والإبيدوت . وهناك بعض المعادن الأخرى التي تشيع في الصخور المتحولة ، وتكون موجودة أيضا في بعض الصخور النارية، مثل: الجارنت والكوارتز والمسكوفيت والأمفيبول والفلسبار.

ويشير التحول منخفض الرتبة **low-grade metamorphism** إلى عمليات تحول تحدث عند درجات حرارة تتراوح بين نحو 200°م و 320°م وعند ضغوط منخفضة نسبيا، بينما يشير **التحول عالى الرتبة high-grade metamorphism** إلى عمليات تحول عند درجات حرارة أعلى من نحو 550°م وضغط عالى .

وقد تتعرض بعض الصخور المتحولة أثناء تكوّنها لدرجات حرارة عالية وضغط مرتفع ، فيحدث تحول عالى الرتبة ، ثم تتعرض تلك الصخور المتحولة فيما بعد لضغوط وحرارة أقل فتتحول مرة أخرى تحت الظروف الجديدة ، من صخور متحولة عالية الرتبة إلى صخور متحولة منخفضة الرتبة في عملية تعرف بالتحول التراجعى **retrograde metamorphism** .

ويحدث معظم التحول في القشرة الأرضية وحتى الحد الفاصل بين القشرة والوشاح . بالإضافة إلى ذلك، فإن التحول يمكن أن يحدث عند سطح الأرض . حيث تحدث تغيرات التحول في سطح التربة والرواسب المخبوزة baked المتواجدة مباشرة أسفل فيوض اللابة البركانية ، بتأثير الحرارة الناشئة عن ملامسة اللابة .

II. العوامل الطبيعية والكيميائية التى تتحكم فى عملية التحول

تؤدى تغيرات التحول إلى أن يدخل صخر ما فى اتزان مع ظروف جديدة مغايرة للظروف التى نشأ فيها. فالصخر الرسوبى الذى تكوّن من عمليات ما بعد الترسيب ، يكون فى اتزان مع المتوسط العام للضغط ودرجة الحرارة الناشئين عن دفن الرواسب على عمق كيلومترات قليلة . وقد يتكون هذا الصخر أثناء عملية التجبل (بناء الجبال) والتى يتم فيها دفن الصخر الرسوبى على عمق أكبر ويتعرض إلى درجة حرارة تزيد عن 500° ، وبعد مرور وقت كاف ـ عادة مليون سنة أو أكثر ـ يتغير التركيب المعدنى ونسيج الصخر بحيث يدخل الصخر فى اتزان مع درجات الحرارة والضغوط الجديدة . وكلما زاد العمق ، وزادت بالتالى درجات الحرارة فى القشرة ، كانت تغيرات التحول أسرع .

أ - درجة الحرارة

للحرارة تأثير كبير على التركيب المعدنى ونسيج الصخر ، حيث تعمل الحرارة على كسر الروابط الكيميائية ، كما تغير البنية البلورية الموجودة فى الصخور النارية. وعندما يتكيف الصخر مع درجة الحرارة الجديدة ، فإن الذرات والأيونات يعاد تبلورها، حيث ترتبط فى ترتيبات جديدة لتكوّن تجمعات معدنية جديدة . وتنمو العديد من البلورات الجديدة إلى حجم أكبر من ذلك الذى كان فى الصخر الأصلى . وقد يصبح الصخر شريطيا banded نتيجة تجمع المكوّنات المختلفة فى مستويات منفصلة . ومن المعروف أن المعادن المختلفة تتبلور وتبقى مستقرة عند درجات الحرارة المختلفة ، لذلك فإنه يجب عند دراسة الصخور المتحولة، وكما يحدث عند دراسة الصخور النارية ، استخدام تركيب الصخر لتقدير درجة الحرارة التى تكوّن عندها الصخر . وهكذا ، فإن التجمع المعدنى

للصخر المتحول يمكـن أن يـستخدم كترمـومتر أرضى (مقيـــاس حــــرارة الأرض) geothermometer . ويرجع التغير فى درجات حرارة الـصخور إلى أسـباب عديد، ة نذكر منها:

1- التداخل الصهارى بالقرب من المنطقة التى يحدث بها التحول ، حيث تفقد الـصهارة حرارتهـا أثنـاء التبلور، وتنتقل الحرارة إلى الصخور المحيطة .

2- تدرج حرارة الأرض geothermal gradient، وهو معدل زيادة درجة حرارة الأرض مع العمق، والذى يختلف من منطقة لأخرى .

3- الاضمحلال الإشـعاعى radioactive decay للعنــاصر المــشعة الموجــودة فى بعــض معــادن الصخور النارية ، أو بعض العناصر المشعة التى استخلصتها الرواسب من ماء البحر.

4- الحرارة المنبعثة من الأعـماق خـلال الوشـاح عـن طريـق خلايـا الحمـل الـدورانى convection cells، والتـى تـشمل : التيــار الـصاعد للمـواد الساخنة ، والتيار المستعرض والتيار الهابط للمواد الباردة .

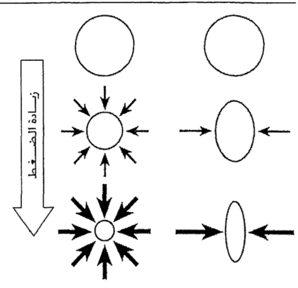
5- الاحتكاك الـذى يحـدث أثنـاء تـشوه الـصخور، خاصـة عـلى امتـداد الـصدوع ، ويكـون المـصدر الحرارى فى هذه الحالة قليلا .

ب - الضغط

يعمل الضغط عـلى تغيـير نـسيج الـصخر وتركيبـه المعدنى . ويتعرض الصخر الصلب إلى نوعين أساسيين مـن الـضغط (شـكل2.8) ، والـذى يـسمى إجهـادا :stress

- ضغط حـابس **confining pressure** ويـسمى أيضا بضغط الحمل load pressure ، وهو ضـغط عام فى كل الاتجاهات ، مثل الضغط الـذى يـؤثر بـه الغلاف الجوى على سطح الأرض ، أو الضغط الذى يـؤثر عـلى الغواصـين فى الميـاه العميقـة. ويغـير المـستويات العاليـة مـن الـضغط الحـابس التركيـب المعدنى ، عن طريق ضغط الذرات مع بعضها بعـضا لتكوّن معادن جديدة لها بنية بلورية أكثر كثافة .
- ضغط موجه **directed pressure** يؤثر فى اتجـاه معين فقط ، مثلما نضغط على كرة من الصلصال بـين إبهـام اليـد والـسبابة . وتـؤدى حركـات الألـواح المتقاربة إلى نشأة الـضغط الموجـه ، الـذى يـؤدى إلى تشوه الصخور . وحيث إن الحـرارة تقلـل مـن قـوة الصخور ، فإن الـضغط الموجـه يـسبب طيـا شـديدا وتشوها للصخور المتحولـة فى أحزمـة بنـاء الجبـال ، حيـث تكـون درجـات الحـرارة مرتفعـة . ويعـرف الـــضغط الموجـــه أيـــضا **بالإجهـــاد المتبـــاين differential stress** أو الإجهـاد التـضاغطى compressive stress .

واعتمادا على نوع الإجهـاد الموجـه للـصخور ، يـتم ضغط المعادن المتحولة أو استطالتها، أو دورانها لتترتب فى اتجاه معين . وهكذا يؤدى الضغط الموجـه إلى إعـادة ترتيب البلورات المتحولة الجديدة المتكونة أثنـاء إعـادة تبلور المعادن فى مـستويات معينـة تحـت تـأثير الحـرارة والـضغط . وأثنـاء إعـادة تبلـور الميكـا مـثلا ، تنمـو البلـورات وتــتراص مــستويات الــصفائح فى البنيــة الـسيليكاتية عموديـا عـلى الـضغط الموجـه . وتترتـب المعادن المستطيلة مثل الأمفيبولات خطيا فى مـستويات عمودية عـلى الإجهـاد الموجـه . ويمكـن أن نـستخدم المعلومات المستمدة من التجارب المعملية عن تغـيرات التركيب المعدنى والنـسيج فى التعـرف عـلى الـضغوط التى كانت تسود فى منطقة مـا أثنـاء التحـول . وهكـذا يمكن استخدام التجمع المعـدنى فى تقـدير الـضغط أو كباروميتر أرضى .



شكل (2.8): الفرق بين الضغط الموجه والضغط الحابس .

جـ - التغيرات الكيميائية أثناء التحول

قد يتغير التركيب الكيميائى لصخر ما أثناء التحول بدرجة ملحوظة ، نتيجة إضافة أو إزالة بعض مكوناته الكيميائية . ومن الشائع أن يؤدى التداخل الصهارى إلى تحولات كيميائية فى الصخور المحيطة ، مثل الطفل أو الحجر الجيرى ، حيث تصعد السوائل الحرمائية من الصهارة محملة بعناصر الصوديوم والبوتاسيوم والسيليكا والنحاس والزنك الذائبة ، بالإضافة إلى عناصر كيميائية أخرى ذائبة فى الماء الساخن تحت تأثير الضغط . وربما تستمد هذه العناصر من كل من الصهارة والصخور التى تم التداخل فيها . وأثناء تخلل المحاليل الحرمائية الصاعدة للقشرة الأرضية السطحية فإنها تتفاعل مع الصخور التى حدث بها التداخل ، حيث تحدث تغيرات فى التركيب الكيميائى والمعدنى ، وأحيانا يحل تماما معدن محل معدن آخر دون تغير فى نسيج الصخر . ويسمى هذا النوع من التغير فى تركيب الصخر العام نتيجة نقل السوائل للعناصر الكيميائية داخل أو خارج الصخر بالتحوال **metasomatism** (من meta بمعنى تغير وsoma بمعنى عصير) . ويتكون عديد من الرواسب ذات القيمة الاقتصادية كالنحاس والزنك والرصاص وخامات فلزية أخرى بهذا النوع من الإحلال الكيميائى.

دور السوائل فى عملية التحول: يحدث عديد من التغيرات الكيميائية والمعدنية أثناء عملية التحول بسبب السوائل التى تتخلل الصخر الصلب . وعلى الرغم من أن الصخور المتحولة تكون فى منكشفاتها جافة تماما ، وبها مسامية منخفضة للغاية ، إلا أن معظمها يحتوى على سوائل فى مسامها (الفراغات بين الحبيبات) التى تكون متناهية الدقة . ويتكون هذا السائل أساسا من الماء المحتوى على ثانى أكسيد الكربون وكميات ضئيلة مذابة من غازات وأملاح ، وكميات شحيحة من المعادن المكوّنة للصخر. وتعمل تلك السوائل المتخللة بين الحبيبات على زيادة سرعة التفاعلات الكيميائية أثناء التحول . وحيث إن التغير فى درجات الحرارة والضغط يحطم البنية البلورية ، فإن الذرات والأيونات تتحرك بين الصخر والسوائل الموجودة به . وكلما كانت حركة تلك الذرات والأيونات أسرع داخل الصخر ، كانت أقدر على التفاعل مع المواد الصلبة ، وتكونت معادن جديدة .

ويستمد ثانى أكسيد الكربون الموجود فى سوائل الصخور المتحولة أساسا من الصخور الرسوبية (الأحجار الجيرية وأحجار الدولوميت) ، بينما يستمد الماء من الصلصال والمعادن المائية الأخرى ، وليس من الماء الموجود فى مسام الصخور الرسوبية ، حيث يتم التخلص من نسبة كبيرة منه خلال عمليات ما بعد الترسيب .

وتتحرك السوائل أثناء عملية التحول على امتداد حدود الحبيبات أولاً ، ثم تتحرك خلال القنوات المفتوحة ، حيث يتكسر الصخر نتيجة ضغط السائل . وتقابل السوائل أثناء صعودها إلى أعلى فى القشرة الأرضية صخورا أكثر برودة مما يؤدى إلى ترسب الكوارتز فى الكسور والشقوق والفجوات وتكوّن عروق الكوارتز التى تشيع فى الصخور المتحولة منخفضة الرتبة .

ومع تقدم عملية التحول تتكسر الروابط الكيميائية بين المعادن وجزيئات الماء، حيث يؤدى التحول إلى انتزاع الماء dehydration أو يتفاعل الماء مع الصخر. فالمعادن التى تحتوى على الماء وتكون موجودة فى الصخور الرسوبية تحتوى أصلاً على الكثير من الماء المرتبط بروابط كيميائية، بالإضافة إلى أن الصخر يحتوى على ماء إضافى فى المسام. ويُفقد هذان النوعان من الماء أثناء عملية التحول، ويصعد الماء إلى مناطق القشرة الأرضية الضحلة. وكلما ارتفعت رتبة التحول، انخفض محتوى الصخر من الماء. وعلى العكس مما سبق، تأخذ معادن الصخور البركانية المافية، والتى لاتحتوى على ماء فى بنيتها البلورية، بعض جزيئات الماء من السوائل الموجودة فى المسام خلال المراحل الأولى من التحول. وفى هذا التفاعل، فإن هذه المعادن اللامائية، أى الخالية من الماء، تكوّن معادن متبلورة جديدة من الميكا والكلوريت ومعادن أخرى مائية - أى تتكون فيها روابط كيميائية بين الماء والمكونات الكيميائية الأخرى.

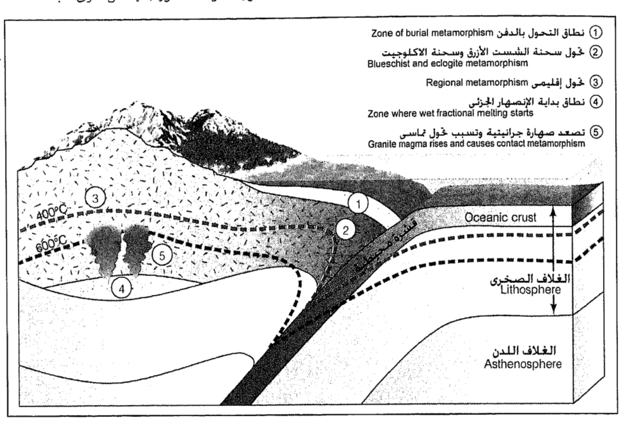
III. أنواع التحول

تحدث عملية التحول حينما يتعرض صخر لظروف مغايرة لتلك التى نشأ فيها، حيث يصبح الصخر غير مستقر، ويتغير تدريجيا حتى يصل إلى مرحلة اتزان مع ظروف البيئة الجديدة. ويحدث التغير فى درجات الحرارة والضغط السائدين فى المنطقة الممتدة من عدة كيلومترات تحت سطح الأرض حتى الحد الفاصل بين القشرة والوشاح mantle.

وقد أمكن مؤخرا، واعتمادا على التكنولوجيا الحديثة، إجراء تجارب معملية لمحاكاة ظروف التحول، والمزج بين عاملين أو أكثر من عوامل الضغط والحرارة والتركيب الكيميائى، والتى قد يحدث عندها التحول. ولقد أدت الملاحظات الحقلية إلى تصنيف الصخور المتحولة إلى عدة مجموعات على أساس الظروف الجيولوجية لأصل الصخر. وفيما يلى وصف لهذه المجموعات، بينما يوضح شكل(3.8) علاقة هذه الأنواع بأوضاعها فى تكتونية الألواح.

أ - التحول الإقليمى

يعتبر التحول الإقليمى regional metamorphism، أكثر أنواع التحول انتشاراً، حيث تؤثر كل من درجة الحرارة المرتفعة والضغط العالى على أحزمة أو مساحات شاسعة من القشرة الأرضية تصل إلى عشرات الآلاف من الكيلومترات المربعة. وتتغير درجات الحرارة أثناء التحول الإقليمى بدرجة كبيرة. فهى تتراوح بين 300 و 800°م (الحد الأقصى للتحول نحو 900°م)، فى حين يتراوح الضغط بين 2 و 6 كيلوبار أو أكثر. ويستخدم هذا المصطلح لتمييز هذا النوع من التحول عن التغيرات المحلية الأخرى، والتى تحدث بالقرب من المتداخلات النارية أو الصدوع. ويحطم التحول الإقليمى بعض أو كل الأنسجة الأصلية للصخور النارية أو الرسوبية، حيث يؤدى إلى تكوّن معادن وأنسجة جديدة. وهناك ثلاثة مواضع تكتونية يتم فيها التحول الإقليمى: 1. الأقواس البركانية حيث تنشأ بعض أحزمة التحول الإقليمى نتيجة درجات الحرارة المرتفعة والضغوط المتوسطة إلى العالية نتيجة اندساس الألواح المحيطية بعمق فى الوشاح والتسخين بالصهارة الصاعدة (شكل 3.8). 2. الخنادق المحيطية، حيث تتكون الأحزمة الأخرى نتيجة الضغط العالى والحرارة المنخفضة نسبيا بالقرب منها، ويسبب الاندساس سحب القشرة المحيطية الباردة نسبيا إلى أسفل. 3. حدود الألواح القارية المتقاربة (المتصادمة)، حيث يحدث التحول الإقليمى تحت ضغوط ودرجات حرارة عالية جدا فى المستويات الأعمق من القشرة، ويتشوه الصخر وتتكون أحزمة جبال مرتفعة.



شكل (**3.8**): رسم تخطيطى لحد لوح متقارب **convergent plate boundary** يوضح أماكن التحول المختلفة . لاحظ أن الخطوط المقطعة تصل بين نقاط درجات الحرارة المتساوية (الأيزوثرم **isotherm**) والتى تعرف بكنتورات درجات الحرارة .

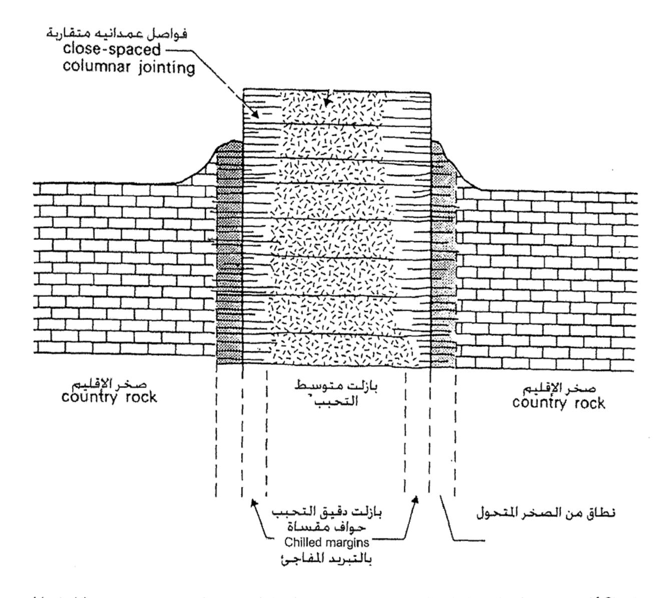
1) نطاق التحول بالدفن **burial metamorphism**.
2) نطاق التحول الإقليمى **regional metamorphism** تحت الضغوط العالية ودرجات التحول المنخفضة نسبيا (صخور الشست الأزرق والإكلوجيت) .
3) نطاق التحول الإقليمى (صخور الشست الأخضر والأمفيبوليت).
4) نطاق بداية الانصهار الجزئى الرطب.
5) تصعد الصهارة الجرانيتية وتسبب التحول التماسى **contact metamorphism** .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ب - التحول التماسى (الحرارى)

تتسبب المتداخلات النارية فى تعرض الصخور المحيطة بها مباشرة إلى ظروف جديدة من الحرارة والضغط مما يؤدى إلى تحول الصخر الأصلى . ويعرف هذا النوع من التحول المحلى بالتحول التماسى **contact metamorphism** ، كما يسمى أحيانا بالتحول الحرارى **thermal metamorphism** . ويؤثر هذا النوع من التحول عادة على منطقة رقيقة فقط من الصخور المحيطة ، على امتداد أسطح التلامس مع المتداخلات النارية. ويرجع التحول المعدنى فى العديد من الصخور المتحولة بالتماس ، وخاصة عند المتداخلات القريبة من السطح إلى درجة حرارة الصهارة المرتفعة ، ويكون تأثير الضغط مهمّا عندما تتداخل الصهارة على أعماق كبيرة . ويكون التحول التماسى الناشئ عن الصخور البركانية محدودا ، حيث تتكون فى هذه الحالات نطاقات رقيقة جدا بسبب تبرد اللابة بسرعة عند السطح ، ولا يوجد ما يكفى من الوقت لتؤثر حرارة اللابة على الأجزاء العميقة من الصخور المحيطة.

ويسمى نطاق الصخر فى المنطقة المحيطة بالمتداخل الناري، والذى تظهر به آثار التحول باسم هالة المتداخلات الصغيرة، مثل: الجدد الموازية sills أو القواطع dykes والتى يبلغ سمكها عدة أمتار قليلة،

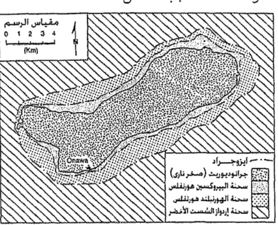


شكل (**4.8**): قطاع عرضى فى قاطع من البازلت يبلغ عرضه مترا واحدا، يوضح التحول التماسى contact metamorphism (الحرارى) فى الصخور المحيطة.

(After Mason,R., 1978: Petrology of the metamorphic rocks. George Allen and Unwin Murby, Thomas, London).

التحول **metamorphic aureole**. ويعتمد سمك هالة التحول على حجم الجسم المتداخل ودرجة حرارته، وعلى كمية الماء فى الصخور المتحولة. ففى وفى غياب السوائل، فإن نطاق التحول يكون فقط عدة سنتيمترات سمكا (شكل 4.8). ويكون الصخر المتحول صلبا ودقيق التحبب ومكوّنا من كتلة من

الحبيبات المتداخلة المتساوية الحجم . ويحتوى المتداخل النارى الكبير الحجم على طاقة حرارية أكبر من تلك الموجودة فى المتداخلات الصغيرة ، كما يخرج منه الكثير من بخار الماء . وعندما يبلغ قطر المتداخل النارى كيلومترا أو أكثر ، فقد يصل عرض هالة التحول عدة مئات من الأمتار أو أكثر ، وتميل الصخور المتحولة لأن تكون خشنة التحبب (شكل 5.8).



شكل (**5.8**): خريطة توضح هالة التحول **contact aureole** ، والتى تتكون فى المنطقة المحيطة بالمتداخل النارى . وتوضح الخريطة نطاقات التحول متحدة المركز تقريبا يفصل بينها الأيزوجراد (خط على الخريطة يصل بين النقاط التى حدثت عندها عمليات التحول تحت ظروف التحول والضغط نفسها).

(After Philbrick, 1936, Moore, J. M., 1960, in Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm. C. Brown Publishers).

وفى داخل نطاقات التحول الكبيرة والتى تخللتها السوائل الحارة ، فإنه يمكن تعرف نطاقات عديدة متحدة المركز تقريباً مكونة من تجمعات معدنية ، يتميز كل نطاق منها بمدى معين من درجه الحرارة (شكل 5.8). حيث تكون درجات الحرارة عالية بجوار الجسم النارى مباشرة ، وتتكون معادن لامائية مثل : الجارنت والبيروكسين ، بينما توجد المعادن المائية مثل : الإبيدوت والأمفيبول ، ثم معادن : الميكا والكلوريت فى النطاقات الخارجية البعيدة عن الجسم النارى .

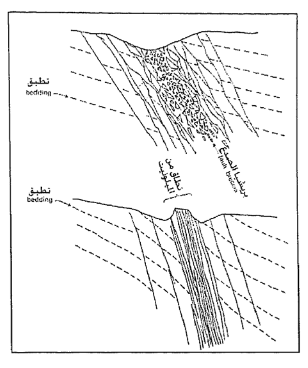
وتعتمد مجموعة المعادن الموجودة فى كل نطاق على التركيب المعدنى للصخر الذى يتداخل فيه الجسم النارى وعلى السائل المنبثق من الجسم النارى ، علاوة على درجة الحرارة والضغط .

ويتواجد التحول التماسى على امتداد الألواح المتقاربة والنقاط الساخنة المحيطية والقارية، حيث يتواجد النشاط النارى الذى يرتبط به التحول . وحيث إن النشاط النارى يتواجد أيضا فى التحول الإقليمى ، لذلك يوجد التحول التماسى أيضا فى أحزمة الجبال المشوهة .

جـ - التحول التهشمى

قد يحدث التحول على امتداد الصدوع ، حيث تسبب الحركات التكتونية تكسر القشرة الأرضية وانزلاقها ، مما يؤدى إلى تكسر الصخر الصلب وطحنه على امتداد سطح الصدع ، ويتكون نسيج مكسر ومطحون (شكل 6.8). وقد يتحول الصخر المطحون إلى كتلة كالعجين، وهذا هو **التحول التهشمى cataclastic metamorphism** . ويسمى التحول التهشمى أحيانا باسم التحول الديناميكى (التحول الحركى) dynamic metamorphism .

فعندما يتعرض صخر خشن التحبب مثل الجرانيت إلى إجهادات متباينة شديدة ، فإن حبيبات المعادن تتكسر وتطحن . ومع زيادة التحول التهشمى ، فإن حبيبات المعادن تصبح مستطيلة ويبدى الصخر نسيجاً متورقا ويعرف باسم الميلونيت . ويحدث هذا التحول أساساً تحت ضغط مرتفع نتيجة طحن وجز shearing الصخر أثناء الحركات التكتونية . لذلك تتواجد الصخور التهشمية غالبا مع الصخور المتحولة إقليميا فى أحزمة الجبال المشوهة بشدة ، حيث يكون التصدع ممتدا وشاملا.



شكل (6.8): قطاعان عرضيان في نطاقات صدوع أثرت في صخور كتلية صلدة مثل الجرانيت.

(أ) نطاق صدع به بريشيا صدع ، تكوّن عند مستوى ضحل في القشرة الأرضية .

(ب) نطاق صدع به ميلونيت mylonite ، تكوّن عند مستوى أعمق في القشرة الأرضية .

(After Mason,R., 1978: Petrology of the metamorphic rocks. George Allen and Unwin Murby, Thomas, London).

د - التحول الحرمائى

هناك نوع آخر من التحول يسمى **التحول الحرمائي hydrothermal metamorphism** يكون مصاحبا لحيود وسط المحيط ، ويعرف التحول في هذه الحالة بتحول قاع المحيط . حيث تتباعد الألواح وتنتشر وتكوّن الصهارات البازلتيه الصاعدة قشرة محيطية جديدة . ويعمل البازلت الساخن على تسخين ماء البحر المتخلل في كسوره . وتحفز الزيادة في درجة الحرارة التفاعلات الكيميائية بين ماء البحر وصخر البازلت ؛ ليتكون نوع من البازلت يختلف في تركيبه الكيميائى عن تركيب البازلت الأصلى ، نتيجة إضافة عنصر الصوديوم وخروج عنصر الكالسيوم أساسا ، يعرف بالسبيليت spilite . ويحدث التحول الحرمائى أيضاً في القارات ، حيث تحول السوائل الحرمائية hydrothermal solutions الصاعدة من المتداخلات النارية كلاً من الصخور التى تعلوها وكذلك الصخور المدفونة فى الأعماق ، والتى يتم تحولها إقليميا. وقد يحدث التحول الحرمائى فى مناطق القشرة الأرضية المختلفة ، والتى تتواجد بها محاليل حرمائية .

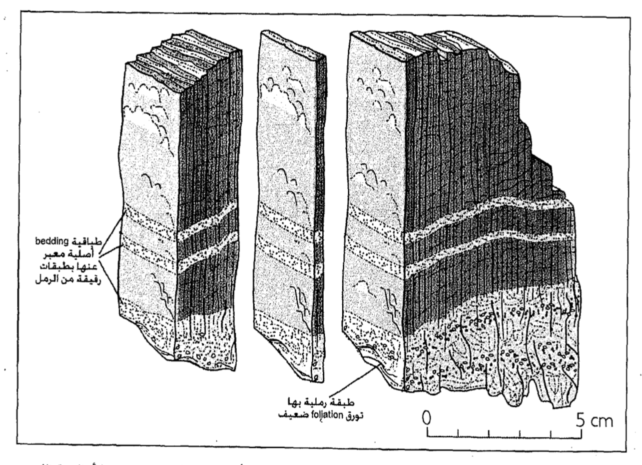
هـ - التحول بالدفن

من المعروف أن الصخور الرسوبية تدفن تدريجيا نتيجة هبوط القشرة الأرضية (الأحواض الرسوبية) والتراكم السميك للرواسب ، فترتفع درجة حرارتها ببطء وتصبح فى حالة اتزان مع درجات حرارة القشرة المحيطة بها . ويحدث بسبب هذه العملية تغيرات ما بعد الترسيب ، والتى تشمل تغير التركيب المعدنى والنسيج. وتتدرج عمليات ما بعد الترسيب إلى **تحول بالدفن burial metamorphism** ، وهو تحول منخفض الرتبة يحدث بسبب الحرارة والضغط الناشىء من حمل الرواسب والصخور الرسوبية المتراكمة .

IV. أنسجة التحول

تتكون فى الصخور المتحولة أنسجة جديدة نتيجة لتحولها . ويتحدد نوع هذا النسيج بناءً على حجم وشكل مكوناته من نوع البلورات ، بالإضافة إلى طريقة ترتيبها . وتعتمد بعض أنسجة التحول على وجود أنواع معينة من المعادن مثل الميكا ، والتى تتميز بوجود هيئة صفائحية . وقد ترث أنسجة التحول بعض أنسجة الصخر الأصلى ؛ لذلك فقد ينعكس حجم حبيبات صخر رسوبى على حجم البلورات التى تتكون أثناء التحول . ويدل كل نوع من أنسجة التحول على نوع عملية التحول التى أدت إلى نشأته .

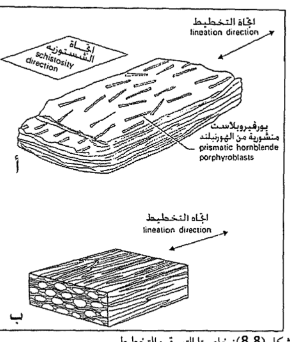
التورق والانفصام: التورق **foliation** هو أكثر أنسجة الصخور المتحولة تحولا إقليميا شيوعا. ويشتق هذا المصطلح من الكلمة اللاتينية **folium** بمعنى ورقة ؛ حيث يتكون من عدد من المستويات المتوازية المستوية أو المتموجة تكوّنت نتيجة التشوه . وعموما تقطع مستويات التورق الصخور ، حيث تميل على مستويات تطبق الصخر الرسوبى الأصلى بزاوية ميل ، كما قد توازى مستويات التطبق أيضا (شكل 7.8) . ويرجع السبب الرئيسى للتورق إلى وجود معادن صفائحية (ميكا وكلوريت أساسا) تتبلور على هيئة بلورات صفائحية رقيقة ، ثم تتراص هذه البلورات موازية لمستويات التورق . وتأخذ المستويات المتوازية توجيها مفضلا **preferred orientation** للمعادن، حيث تأخذ مستويات المعادن الصفائحية أثناء تبلورها اتجاها مفضلا معينا ، يكون عموديا على الاتجاه الرئيسى للقوى التى تضغط على الصخور وتؤدى إلى تشوهها وتحولها ، كما يتضح من (شكل 8.8 أ) . وقد تكتسب المعادن الصفائحية الموجودة فى الصخر الأصلى توجيها مفضلا ، وبذلك يتكون تورق نتيجة دوران البلورات حتى تصبح موازية للمستوى المتكوّن . وقد يؤدى التشوه اللدن أو ثنى الصخر الساخن اللين إلى تكوّن بلورات لها توجيه مفضل .



شكل (**7.8**): كسرات من الإردواز (يسار) توضح خاصية التورق foliation (خطوط رأسية) وبقايا تطبق سابق . ويلاحظ أن التورق الذى قد ينفصل الإردواز على امتداده ، وهو نتيجة لعملية التحول ، يتقاطع مع التطبق ، والذى قد ينفصل الإردواز على امتداده أيضا ،وهو نتيجة لعمليات رسوبية .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

كـــما تميـل المعـادن التـى تكـون بلوراتهـا مـستطيلة كالقلم ، مثل معادن الأمفيبولات ، لأن تأخذ بلوراتها توجيها مفضلا أثناء التحول ، حيث تترتـب البلـورات عادة موازية لمستويات التورق . وتبدى الـصخور التـى تحتـوى عـلى العديـد مـن بلـورات الأمفيبـول ، مثـل البركانيات المافية المتحولة مثل هذا النوع من النـسيج ، والذى يعرف بـالتخطيط **lineation** ، حيـث تترتـب المعـادن المـستطيلة ، مثـل الهورنبلنـد ، فى وضـع مـواز لخطوط داخل الصخر (شكل 8.8 ب) .



شكل (8.8): خاصيتا التورق والتخطيط
(أ) شـست يتميـز بوجـود التـورق (شـستوزية schistosity) والتخطيط lineation
(ب) صخر يتميز بوجود التخطيط lineation .
(After Mason,R., 1978: Petrology of the metamorphic rocks. George Allen and Unwin Murby, Thomas, London).

ويحتوى الإردواز على الكثير من أشـكال التـورق . والإردواز صخر متحول ينفصل بـسهولة عـلى امتـداد أسطح ناعمة مستوية إلى ألواح (شكل 7.8). ويتكـون هذا الانفـصام الإردوازى **slaty cleavage** (يجـب ألا يختلط هـذا المـصطلح مـع انفـصام المعـدن مثـل المسكوفيت) عـلى أبعـاد منتظمـة ومتوسـطة الرقـة فى الصخر. ولقد استخدمت هذه الصفة منذ القدم لعمـل إردواز سميك أو رقيق لتغطية أسطح المبـانى فى أوربـا وأمريكا وكذلك لعمل السبورات .

أ. الأنسجة المتورقة

تصنف الصخور المتورقة تبعا لأربع ظواهر رئيـسية (شكل 7.8) هى:

1. طبيعة التورق .
2. حجم البلورات .
3. الدرجة التى تتجمـع فيهـا المعـادن إلى شرائـط فاتحة وغامقة .
4. درجة التحول .

وسنتناول فيما يلى الأنواع الرئيسية للصخور المتورقة .

1. الإردواز

الإردواز **slate** هو أقل الصخور المتورقـة رتبـة فى التحول . وتكون هـذه الـصخور التـى تتميـز بأسـطح انفصال مستوية (انفصام إردوازى) دقيقـة التحبـب إلى الحـد أنـه لا يمكـن رؤيـة المعـادن فيهـا بـسهولة دون استخدام المجهر (الميكروسكوب المستقطب) . وتتكون هذه الصخور نتيجة تحـول الطفـل غالبـا ، أو رواسـب الرماد البركانى أحيانا . ويكون الإردواز رماديا قاتما إلى أسود عـادة ، يتلـون بـسبب وجـود القليـل مـن المـادة العضوية ، والتى كانت توجد فى الطفـل أصـلاً . وقـد يكتسب الإردواز ألوانا حمراء أو قرمزية ، نتيجة وجـود معـادن أكاسـيد الحديـد . أمـا لـون الإردواز المخـضر فيرجع إلى وجود الكلوريت ، وهـو معـدن سـيليكاتى صفائحى أخضر اللون يدخل الحديد فى تركيبه ويرتبط مع الماء .

2. الفيليت

يكـون الفيليـتphyllite أعـلى قلـيلاً فى درجـة التحول من الإردواز ، ولكنـه يـشبه الإردواز فى أصـله وصفاته . وتميل صخور الفيليـت لأن يكـون لهـا بريـق لامع من بلورات الميكا ، والتى تكون أكـبر قلـيلاً عـن تلك الموجـودة فى الإردواز . وتميـل صـخور الفيليـت للانفصال إلى ألواح مثل الإردواز ، ولكنها تكون أقـل انتظاما . ويظهر الصخر تورقا واضحا، ولذلك يـسمى فيليت phyllite (من الكلمة اليونانية phylloo بمعنى ورقة).

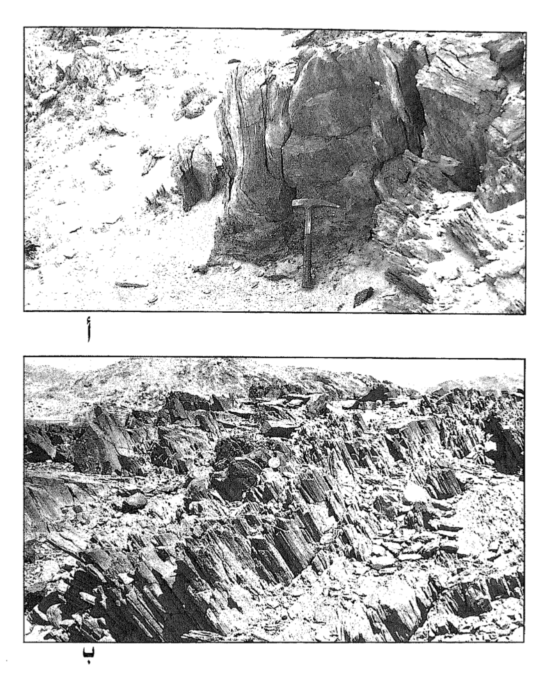
3. الشست

عند رتبة التحول المنخفض ، تكون بلورات المعـادن الصفائحية عموما صـغيرة جـدا لكـى تـرى ، ويكـون التورق على مسافات متقاربة والطبقـات رقيقـة جـدا . وإذا تم تحول الـصخور المتحولـة إلى رتبـة أعـلى ، فـإن التورق يصبح أكثر وضوحاً وانتشارا خـلال الـصخر ، وتنمو البلورات الصفائحية فى الوقت نفسه إلى أحجـام ترى بالعين المجردة ، وقد تميـل المعـادن إلى التجمـع فى شرائـط فاتحـة وأخـرى داكنـة. ويـؤدى هـذا الترتيـب للمعادن الـصفائحية فى الـصخور خـشنة التحبـب إلى تكـوّن التـورق ، والـذى يعـرف بالشـستوزية schistosity ، والذى يميز صخور الشست (شـكل 9.8أ).

وتعتبر صخور الشست schists من أكثر أنـواع الصخور المتحولة انتشارا (شكل 9.8) ، وتحتـوى عـلى أكثر من 50 ٪ من مكوناتها معادن صـفائحية ، تتكـون أساسا من كلوريت وميكا المسكوفيت والبيوتيت . وقد تحتوى صخور الشست على طبقات رقيقة من الكوارتز والفلسبار أو كليهما، اعتمادا على محتـوى الطفـل أصـلاً مـن معـدن الكـوارتز . وعمومـاً يتكـون الشـست فى مراحل التحول الإقليمى المتقدمة للفيليت . ويـستخدم مصطلح شست لوصف نسيج الصخر ، بغـض النظـر عـن تركيبـه . ويمكـن تمييـز عـدة أنـواع مـن صـخور الشـست مثـل: الشـست الأخـضر greenschist ، والشـست الأزرق blueschist ، والشـست الكلـسى calcschist ، والشست التلكى talc schist .

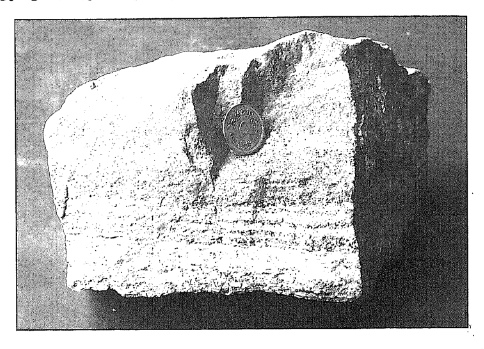
4. النيس

يتكون النـيس gneiss عنـد تحـول عـالى الرتبـة . ويكون النيس فـاتح اللـون ، تتبـادل فيـه شرائـط مـن معادن فاتحـة اللـون مـع أخـرى داكنـة اللـون (شـكل 10.8) . ويكـون التـورق فى النـيس أقـل وضـوحا واستمرارية من التورق الموجود فى النسيج الشستوزى. ولا ينفصل النيس على امتداد أسـطح التـورق ، حيـث توجد به نسبة قليلة من المعادن الـصفائحية . وصـخور النيس صخور خشنة التحبـب ، وتكـون نـسبة المعـادن المحببة إلى المعادن المفلطحة أو الصفائحية أكبر من تلك الموجودة فى الإردواز أو الشست . ونتيجة لذلك .. فإن التورق يكون ضعيفًا ومتقطعًا ، وبالتالى تكـون قابليتـه للانفصال أقـل . ويـسمى التـورق فى صـخور النـيس باسم النيسوزية gneissosity . ويلاحظ أن سـمك الشرائط الموجودة فى النيس يكون أكبر من 2 إلى 3 مم . ويتحول التجمع المعدنى المتكوّن عند درجات الحـرارة العالية والضغوط المنخفضة ، أى تحول منخفض الرتبـة والذى يحتوى على معادن الميكا والكلوريت ، إلى تجمـع معدنى غنى بالكوارتز والفلسبار مع كميـات أقـل مـن الميكا والأمفيبول .



شكل (9.8): خاصيتا الشستوزية schistosity والتخطيط lineation .
(أ) شست تعرض للطى ، وسط الصحراء الشرقية – مصر.
(ب) شست يتميز بوجود تخطيط بمنطقة خميس مشيط – المملكة العربية السعودية . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن – هيئة المواد النووية).

وتتكون الشرائط الفاتحة والداكنة اللون فى النيس نتيجة تجمع معادن الفلسبار والكوارتز فاتحة اللون ومعادن البيوتيت والأمفيبول الداكنة والمعادن المافية الأخرى . وقد تكون بعض أنواع النيس هى المقابل المتحول لصخور رسوبية مثل الحجر الرملى والطفل ، وتعرف بالبارانيس paragneiss ، كما يكون بعضها الآخر المقابل المتحول للصخور النارية مثل الجرانيت ، ويعرف النيس بالأورثونيس orthogneiss .



شكل (10.8): نيس gneiss يتميز بوجود تبادل شرائط ، من معادن فاتحة اللون مع أخرى داكنة، حيث يكون التورق ضعيفا . ويعرف هذا النسيج بالنيسوزى gneissosity ، منطقة مجعف حفافيت بالصحراء الشرقية – مصر .

ب. الأنسجة غير المتورقة (الجرانوبلاستيتية)

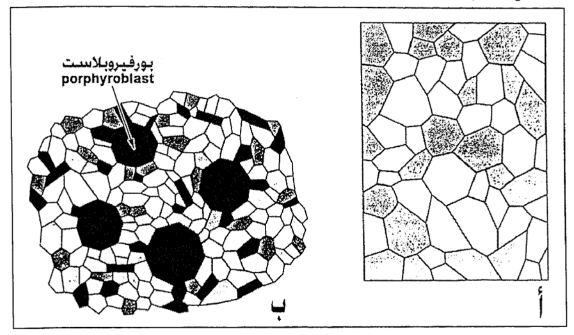
ليست كل الصخور المتحولة متورقة ، حيث يبدى بعضها توجيها مفضلا للبلورات ضعيفا جدا ، مما يؤدى إلى اختفاء التورق تقريبا أو وجوده بنسبه قليلة . وتتكون الصخور غير المتورقة nonfoliated أساسا من بلورات متساوية الأبعاد تقريبا تنمو بالمعدل بنفسه فى جميع الاتجاهات مثل المكعبات أو الكرات مع قليل من البلورات الصفائحية أو المستطيلة الشكل (شكل 11.8أ) . ويعرف هذا النسيج غير المتورق بالنسيج الجرانوبلاستى **granoblastic texture** (blast لاحقة بمعنى تحولى) . وقد تنشأ مثل هذه الصخور نتيجة التحول التماسى أوالإقليمى أوالحرمائى أو التحول بالدفن . وتشمل الصخور غير المتورقة : الهورنفلس والكوارتزيت والرخام والأرجيليت والحجر الأخضر والأمفيبوليت رالجرانيوليت . ويتم تصنيف تلك الصخور ، باستثناء الهورنفلس ، بناء على التركيب المعدنى للصخر . ونعرض هنا وصفا لكلٍّ من هذه الصخور :

1. الهورنفلس

يعتبر الهورنفلس **hornfels** صخرا مميزا للتحول التماسى لصخور الطفل والجريواكى تحت ظروف من الحرارة العالية . ويتكون من حبيبات متساوية الأبعاد ليس لها توجيه مفضل، ولم تتعرض لأى تشوه أو تعرضت إلى تشوه قليل . أما البلورات الطويلة أو الصفائحية فتكون مرتبة ترتيبا عشوائيا . وتتميز صخور الهورنفلس بالنسيج الحبيبى عموما ، على الرغم من أنها تحتوى عادة على معادن البيروكسين المستطيلة وكذلك بعض معادن الميكا .

2. الكوارتزيت

الكوارتزيت **quartzite** صخر شديد الصلابة ، غير متورق وأبيض ، ينشأ من تحول أحجار رملية غنية



شكل (11.8): بعض أنسجة التحول
(أ) نسيج جرانوبلاستى granoblastic texture غير متورق ، حيث تترتب الحبيبات المتداخلة عشوائيا فى الصخر .
(ب) نسيج بورفيروبلاستى porphyroblastic texture ، حيث تحيط البلورات الصغيرة ببلورات أكبر حجما تعرف بالبورفيروبلاستات porphyroblasts .

بالكوارتز أو الصوان . وبعض أنواع الكوارتزيت تكون كتلية – أى لا تتخللها مستويات تطبق تم حفظها أثناء التحول أو مستويات تورق . وتحتوى بعض أنواع الكوارتزيت على طبقات رقيقة من الإردواز أو الشست ، وهى تمثل بقايا لطبقات من الصلصال أو الطفل . ويوجد الكوارتزيت فى كل من مناطق التحول بالتماس والتحول الإقليمى.

3. الرخام

ينشأ الرخام **marble** نتيجة تحول صخور الحجر الجيرى والدولوميت بالضغط والحرارة . وقد ينشأ الرخام نتيجة للتحول التماسى أو بالتحول الإقليمى . وتبدى بعض أنواع الرخام الأبيض النقى مثل رخام كرارة الإيطالى الشهير ، نسيج ناعم يتكون من حبيبات كالسيت متساوية الحجم ومتماسكة ، بينما قد تبدى بعض أنواع الرخام الأخرى تطبق غير منتظم أو تكون مبرقشة من شوائب سيليكاتية أو بعض المعادن الأخرى ، التى كانت موجودة فى الحجر الجيرى قبل التحول .

4. الأرجليت

الأرجليت **argillite** صخر غير متورق ، ينشأ نتيجة التحول الإقليمى منخفض الرتبة لحجر الطين أو أى صخر رسوبى آخر غنى بمعادن الصلصال . ويتميز صخر الأرجليت بمكسر غير منتظم أو مكسر محارى . ويعزى عدم وجود التورق بهذا الصخر جزئيا إلى التحول منخفض الرتبة ، وأيضا لوجود حبيبات كوارتز فى حجم الغرين أو أى معادن أخرى فى صخر الطين الأصلى ، والتى تتميز بعدم الاستطالة أو الصفائحية .

5. الحجر الأخضر

يتكون **الحجر الأخضر greenstone** من صخور بركانية مافية متحولة منخفضة الرتبة. وهى تتكون عندما تتفاعل لابة مافية ورواسب الرماد البركانية مع مياه البحر المتخللة أو مع أى محاليل أخرى . ويغطى البازلت المتكون بهذه الطريقة مساحات كبيرة عند حيود وسط المحيط ، حيث يكون التحول تاما أو جزئيا. كما تتفاعل الصخور البركانية المدفونة فوق القارات، وكذلك الصخور البلوتونية المكوّنة من صخور نارية مافية (جابرو) مع المياه الأرضية (الجوفية) عند درجات حرارة تتراوح بين 150°م إلى 300°م ، وتتكون من صخور الحجر الأخضر . ويرجع اللون الأخضر لهذه الصخور إلى وجود معادن الكلوريت والإبيدوت والأكتينوليت.

6. الأمفيبوليت

الأمفيبوليت**amphibolite** صخر غير متورق غالبا ، يتكون من معادن الأمفيبول وفلسبار البلاجيوكليز. ويتكون الأمفيبوليت نتيجة تحول متوسط أو عالى الرتبة لصخور بركانية مافية (أورثوأمفيبوليت ortho-amphibolite) . وقد تتكون بعض صخور الأمفيبوليت الأخرى نتيجة الإحلال المعدنى للصخور الكربوناتية غير النقية والمارل (باراأمفيبوليت para-amphibolite) .

7. الجرانيوليت

يتميز الصخر المتحول المعروف **بالجرانيوليت granulite** بنسيجه الحبيبى ، إلا أنه يعرف بناءً على تركيبه المعدنى ، حيث يتكون من معادن لامائية anhydrous minerals والذى يدل على رتبة تحول عالية إلى عالية جدا . وتضم الصخور الحبيبية المتكونة عند درجة تحول أقل (التى لا تكون كلها جرانيوليت) صخور الكوارتزيت والهورنفلس . وتشمل المعادن المميزة لصخور الجرانيوليت كلاً من : الكوارتز والبلاجيوكليز والبيروكسين والجارنت والسيليمانيت . ومثل بقية الصخور المتحولة الحبيبية الأخرى ، فإن صخور الجرانيوليت تكون متوسطة إلى خشنة التحبب ، حيث تكون البلورات متساوية الأبعاد، وقد تبدى تورقا ضعيفا أو عدم تورق على الإطلاق . وتتكون هذه الصخور نتيجة تحول الطفل وصخور الحجر الرملى غير النقية وعديد من الصخور النارية الأخرى .

8. السربنتينيت

السربنتينيت **serpentinite** صخر متحول مكوّن من معادن السربنتين . ويتميز بأنه دقيق التحبب، أخضر ، له بريق دهنى ، وتصل صلادته إلى 4 . وهو صخر غير متورق لونه غامق جدا . يشيع فيه وجود أسطح ملساء ناعمة تشبه التورق ، مع لون أفتح أو لون أخضر مبرقش (منقط) . ويتكون السربنتينيت نتيجة تحول صخور نارية بلوتونية فوقمافية .

9. حجر الصابون

حجر الصابون soapstone صخر ناعم جدا ، ذو ملمس صابونى ، دقيق الحبيبات ، يتكون من معدن التلك talc مع كميات مختلفة من معادن السربنتين والكلوريت والأمفيبول . وقد يختلف لون حجر الصابون حتى فى العينة الواحدة . ويتكون حجر الصابون من التلك عندما يحتوى على نسبة عالية من الماغنسيوم ، نتيجة تحول صخر البريدوتيت

(صخر فوقمافى) عند درجة حرارة أعلى قليلا من السربنتينيت .

جـ - أنسجة البلورات الكبيرة (بورفيروبلاست)

قد تنمو المعادن المتحولة الجديدة نتيجة زيادة درجة الحرارة ، وتتكون بلورات كبيرة تحيط بها أرضية دقيقة التحبب من المعادن الأخرى . ويقابل هذا النسيج ظاهريا النسيج البورفيرى فى الصخور النارية . وتعرف هذه البلورات الكبيرة **بالبورفيروبلاستات porphyroblasts** ، وتوجد فى كل من الصخور المتحولة بالتماس والمتحولة إقليميا (شكل 11.8 ب) . وتنمو تلك البلورات نتيجة إعادة ترتيب المكونات الكيميائية للأرضية matrix ، وهى بذلك تحل محل أجزاء من الأرضية، على عكس البلورات الظاهرة فى الصخور النارية، والتى تكون أول المعادن التى تتبلور أثناء تكوّن الصخور النارية . وتنمو بلورات البورفيروبلاستات بسرعة أكبر من بلورات معادن الأرضية ، وذلك على حساب الأرضية . ويتراوح قطر البورفيروبلاستات بين عدة ملليمترات إلى عدة سنتيمترات ، كما يتغير تركيب البورفيروبلاستات أيضا. والجارنت والإشتوروليت والأندالوسيت من المعادن الشائعة فى تكوين بلورات البورفيروبلاستات . ويمكن استخدام التركيب الدقيق وتوزيع بلورات البورفيروبلاستات لهذه المعادن للتنبؤ بضغوط ودرجات حرارة التحول . وجدير بالذكر أن بلورات الجارنت النقى الشفافة تكون ملونة بطريقة جميلة بألوان مثل الأحمر (العقيق الأحمر) والأخضر والأسود ، حيث تبدى تدرجا فى هذه الألوان . وتعتبر هذه الأنواع من الجارنت من الأحجار شبه الكريمة.

د - أنسجة التشوه (الطحن)

يصاحب التشوه التركيبى معظم أنواع التحول ، بينما يؤدى التشوه الميكانيكى على امتداد أسطح الصدوع إلى التحول التهشمى . وتؤدى حركة سطحى كتلتى الصخور أمام بعضهما البعض إلى طمس المعادن وترتيبها فى شرائط وخطوط streaks ، وتتكون صخور متحولة تعرف **بالميلونيت mylonites** . وقد تكون هذه الصخور دقيقة التحبب متورقة عندما تتكون فى الأعماق البعيدة من القشرة الأرضية ، حيث تتشوه الصخور تحت الضغوط العالية جدا بطريقة التشوه اللدن . ويلخص جدول (1.8) أنواع الصخور المتحولة الرئيسية وخصائصها المميزة .

٧. التحول الإقليمى ورتبة التحول

تتكون الصخور المتحولة ، كما أسلفنا ، فى مدى واسع من الظروف . ولذلك تعتبر معادن وأنسجة الصخور المتحولة أدلة للتنبؤ بدرجات الحرارة والضغوط ، وكذلك بأماكن التحول فى القشرة الأرضية ، ووقت تكوّن هذه الصخور. وعند دراسة نشأة الصخور المتحولة فإن الجيولوجيين يبحثون عن شدة التحول ومميزاته بدقة ، وليس فقط عن تحديد هل كان التحول منخفض الرتبة أو عاليها . ولتحقيق ذلك، فإنه يتم تعيين المعادن التى تعتبر أدلة على درجات الضغط والحرارة . ويكون هذا الأسلوب أوضح ما يكون عند التطبيق فى حالات التحول الإقليمى.

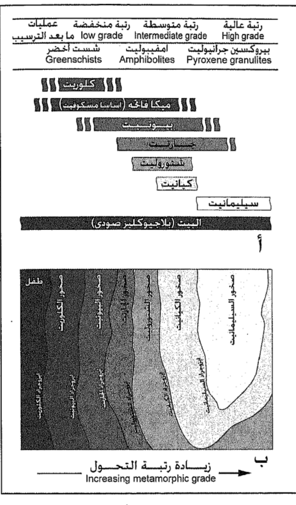
جدول (1.8): أنواع الصخور المتحولة الشائعة وخصائصها المميزة

النسيج	الصخر المتحول	المعادن المميزة	درجة التحول	مميزات الصخور	الصخر الأصلي (المصدر)
متورق Foliated	إردواز Slate	صلصال ، ميكا ، كلوريت	منخفضة	دقيق التحبب، ينفصل بسهولة على امتداد أسطح ناعمة مستوية كالألواح	صخور الطين، صخور الصلصال ، الرماد البركاني
	فيلليت Phyllite	حبيبات دقيقة من الكوارتز، ميكا، كلوريت	منخفضة إلى متوسطة	دقيق التحبب ، بريق لامع	صخور طينية
	شست Schist	ميكا ، كلوريت ، كوارتز ، تلك، هورنبلند ،جارنت ،شتوروليت، جرافيت	منخفضة إلى عالية	تورق مميز ، معادن يمكن رؤيتها	صخور طينية ، كربوناتية، صخور نارية مافية
	نيس Gneiss	كوارتز،فلسبارات، هورنبلند، ميكا	عالية	تبادل شرائط من معادن فاتحة اللون مع أخرى داكنة اللون يمكن رؤيتها	صخور طينية ، صخور رملية، صخور نارية فلسية(جرانيتية)
	أمفيبوليت Amphibolite	هورنبلند، بلاجيوكليز	متوسطة إلى عالية	داكنة اللون، تورق ضعيف	صخور نارية مافية
	ميجماتيت Migmatite	كوارتز، فلسبارات ، هورنبلند ، ميكا	عالية	خليط من صخور متحولة مشوهة ونارية (غالبا جرانيتية)	صخور نارية فلسية مختلطة مع صخور رسوبية
غير متورق Nonfoliated	رخام Marble	كالسيت، دولوميت	منخفضة إلى عالية	حبيبات متداخلة من الكالسيت أو الدولوميت، تتفاعل مع HCl	حجر جيري أو حجر الدولوميت
	كوارتزيت Quartzite	كوارتز	متوسطة إلى عالية	حبيبات كوارتز متداخلة ، صلب	حجر رملي غني بالكوارتز
	الحجر الأخضر Greenstone	كلوريت ، إبيدوت ، هورنبلند	منخفضة إلى عالية	دقيقة التحبب ، لون أخضر	صخور نارية مافية
	هورنفلس Hornfels	ميكا ، جارنت ، أندالوسيت، كورديريت، كوارتز	منخفضة إلى متوسطة	حبيبات دقيقة متساوية الأبعاد ، صلب	صخور طينية

أ - أيزوجراد (خط تساوي رتبة التحول): عمل خرائط لنطاقات التحول

لقد بدأت أول دراسة منظمة تفصيلية لمنطقة صخور متحولة تحولاً إقليميا في مرتفعات اسكتلندا . وقد أوضحت تلك الدراسة أن الصخور التي لها التركيب الكيميائي العام نفسه (تركيب صخر الطفل) يمكن تقسيمها إلى تتابع من النطاقات ، حيث يتميز كل نطاق بتجمع معدني مميز، كما يتميز كل تجمع معدني بظهور معادن جديدة . ولقد تم اختيار معادن دالة index minerals ميزت ظهور كل تجمع معدني جديد ، عند الانتقال من الصخور المتحولة تحت رتبة منخفضة إلى صخور أخرى متحولة تحت رتبة عالية. فالمعادن الدالة هي معادن مميزة تحدد نطاقات التحول التي تكونت في مدى محدد من درجات الحرارة والضغط. والمعادن الدالة التي تم تحديدها حسب ترتيب ظهورها ، هي: الكلوريت والبيوتيت والجارنت والشتوروليت والكيانيت والسيليمانيت . ويتكون هذا التتابع من المعادن الدالة أساسا في صخور كانت غنية أصلا في معادن الصلصال (شكل 12.8 أ). وعندما تتحول الصخور الرملية أو الأحجار الجيرية وأحجار الدولوميت التي تحتوي على معادن الكالسيت

والدولوميت تتكون مجموعة من المعادن الدالة مختلفة تماما . وهكذا تتكون مجموعة مميزة من المعادن الدالة في أنواع معينة من الصخور كلما تقدمت عملية التحول (جدول 2.8) .



شكل (12.8):
(أ) التغير في التركيب المعدني لصخور الطفل shales عند تعرضها للتحول والانتقال من رتبة تحول منخفضة إلى رتبة تحول عالية .
(ب) خريطة توضح منطقة تعرضت إلى تحول إقليمي، حيث تحولت صخور الطفل تحت نفس ظروف تحول الصخور في (أ) من الضغط ودرجة الحرارة . وتحدد خطوط الأيزوجراد ظهور أول المعادن الدالة index minerals.
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

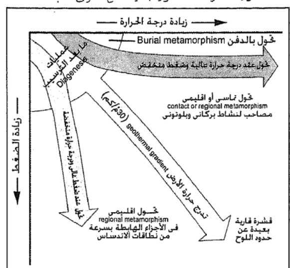
جدول (2.8) نطاقات التحول وتجمعاتها المعدنية الناشئة عن صخور سابقة مختلفة الأنواع

زيادة	رتبة التحول Metamorphic grade	نطاق التحول للصخور الغنية بالصلصال	التجمع المعدني المتكون من صخور سابقة مختلفة: صخور الطين Mudrocks	أحجار جيرية Limestones	صخور نارية مافية Mafic igneous rocks
↓	منخفضة	نطاق الكلوريت	كلوريت*، كوارتز، مسكوفيت، ألبيت[1]	كلوريت*، كالسيت أو دولوميت، ألبيت	كلوريت*، ألبيت، أكتينوليت[2]±إبيدوت
		نطاق البيوتيت	بيوتيت*، كوارتز، ألبيت		
	متوسطة	نطاق الجارنت	جارنت*، ميكا، كوارتز، ألبيت	جارنت*، إبيدوت، هورنبلند، كالسيت	جارنت*، كلوريت، إبيدوت، ألبيت
		نطاق الشتوروليت	شتوروليت*، ميكا، جارنت، كوارتز، بلاجيوكليز	جارنت، هورنبلند*، بلاجيوكليز	
	مرتفعة	نطاق الكيانيت	كيانيت*، ميكا، جارنت، بلاجيوكليز		هورنبلند*، بلاجيوكليز
التحول		نطاق السيليمانيت	سيليمانيت*، جارنت، ميكا، كوارتز، بلاجيوكليز	جارنت، أوجيت*، بلاجيوكليز	

* معدن دال index mineral، (1) ألبيت: بلاجيوكليز غني بالصوديوم ، (2) أكتينوليت: أمفيبول أخضر .

وعند توقيع الأماكن التى ظهرت فيها المعادن الدالة لأول مرة فى صخور لها التركيب الكيميائى للطفل ، أمكن تحديد سلسلة متتابعة من الأيزوجراد . والأيزوجراد **isograd** هو خط على خريطة يصل نقاط أول ظهور معدن معين فى الصخور المتحولة ، أى أنه يصل بين النقاط التى حدثت عندها عمليات التحول تحت ظروف الحرارة والضغط نفسها . ومن الشائع الآن استخدام الأيزوجراد عند دراسة كل أنواع الصخور المتحولة . كما يمكن تطبيقه فى الصخور المتحولة بالتماس وبالدفن أيضا ، بالإضافة إلى الصخور المتحولة إقليميا . ويوضح شكل (12.8 ب) استخدام الأيزوجراد فى تتابع من الصخور المتحولة إقليميا والتى نشأت عن تحول الطفل . ويكون الأيزوجراد الموضوع على أساس معدن دال واحد ، مثل أيزوجراد الجارنت (شكل 12.8 ب) ، قياس مناسب لتقدير ظروف التحول من درجات الحرارة والضغط . وتعرف المناطق بين خطوط الأيزوجراد على الخريطة **بنطاقات التحول metamorphic zones**. فنحن نتحدث عن نطاق كلوريت ونطاق بيوتيت وهكذا ، وهى النطاقات التى ترسم على الخرائط لتوضح العلاقة بين الصخور المتحولة .

وحيث إن الأيزوجراد يعكس درجات الحرارة والضغط التى تكونت عندها المعادن ، لذلك فإن تتابع خطوط الأيزوجراد فى حزام متحول ما قد تختلف عن تلك الموجودة فى حزام متحول آخر . وهذا صحيح لأن الضغط ودرجات الحرارة لا تتزايد بالسرعة نفسها فى كل المناطق والأوضاع الجيولوجية . فقد يزداد الضغط بسرعة عن الحرارة فى بعض المناطق ، بينما قد يكون أبطأ فى مناطق أخرى (شكل 13.8).



شكل (13.8): شكل يوضح أن مسارات الزيادة فى الضغط ودرجة الحرارة الناشئة عن زيادة العمق تعتمد على النشاط التكتونى والنارى . وتعطى المسارات المتعددة تتابعات مختلفة من الصخور المتحولة .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ب – رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلى

يعتمد نوع الصخر المتحول الذى ينشأ عند رتبة تحول grade of metamorphism معينة جزئيا على التركيب المعدنى للصخر الأصلى . ويوضح شكل (12.8) تأثير ظروف التحول على صخور الطفل الغنية فى معادن الصلصال والكوارتز ، وربما بعض معادن الكربونات ، بينما يوضح شكل (14.8) كيف يتبع تحول صخور بركانية مافية مكونة أساساً من الفلسبار والبيروكسين طريقاً مختلفاً . فمثلا ، يتكون معدن الكلوريت نتيجة تحول صخور غنية فى معادن الصلصال مثل الطفل shale عند درجات حرارة منخفضة تصل إلى نحو 200°م ، حيث يشير وجود معدن الكلوريت إلى رتبة تحول منخفضة . ويتكون عند أعلى رتبة تحول للصخور الغنية فى معادن الصلصال معدن السيليمانيت ، حيث تزيد درجة الحرارة عن 500°م .

رتبة عالية High grade | رتبة متوسطة Intermediate grade | رتبة منخفضة Low grade | عمليات ما بعد الترسيب

بيروكسين جرانيوليت Pyroxene granulites | امفيبوليت Amphibolites | شست أخضر Greenschists | زيوليت Zeolites

كلوريت

زيوليت

إبيدوت

(يحتوى على الومنيوم) امفيبول (خال من الالومنيوم)

جارنت

بيروكسين

(غنى بالكالسيوم) بلاجيوكليز (غنى بالصوديوم)

زيادة رتبة التحول
Increasing metamorphic grade

شكل (14.8): التغيرات فى التركيب المعدنى لصخور البازلت وصخور مافية أخرى تعرضت للتحول والانتقال من رتبة تحول منخفضة إلى رتبة تحول عالية . قارن بالتجمعات المعدنية لصخور الطفل عند تعرضها للتحول تحت الظروف نفسها الموجودة فى شكل (12.8) لتلاحظ تأثير التركيب الأصلى على التركيب المعدنى للصخور المتحولة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وتتميز الصخور الناتجة عن التحول الإقليمى لصخور البازلت عند أقل رتبة تحول باحتوائها على معادن الزيوليت ، وهى مجموعة من المعادن الألومينوسيليكاتية المائية التى تشبه الفلسبارات فى تركيبها ، حيث يشكل الكالسيوم والصوديوم والبوتاسيوم الفلزات الأساسية بها . وتتميز هذه المجموعة بأنها تفقد وتكتسب ماء التبلور بسهولة . وتتكون هذه المعادن نتيجة التحول عند درجات حرارة وضغط منخفضة جدا .

وتتداخل رتبة الزيوليت مع رتبة أخرى أعلى فى درجة تحول الصخور البركانية المافية (البازلت) ، مما يؤدى إلى تكوّن صخور الشست الأخضر greenschists ، والتى تضم مجموعة من المعادن الشائعة مثل : معادن الكلوريت والإبيدوت (يحتوى معدن ألومينوسيليكات على عنصرى الحديد والكالسيوم) . ويلى الشست الأخضر تكوّن صخور الأمفيبوليت amphibolites ، والتى تحتوى على كميات كبيرة من معادن الهورنبلند (أحد معادن الأمفيبول) وفلسبار البلاجيوكليز والجارنت . أما أعلى رتب تحول الصخور البركانية المافية حيث تكون درجة الحرارة مرتفعة والضغط متوسط ، فإنها تؤدى إلى تكون الجرانيوليت granulite وهى صخور خشنة التحبب تحتوى على البيروكسين والبلاجيوكليز الكلسى .

وعلى الجانب الآخر ، فإذا كان الضغط مرتفعا ودرجة الحرارة متوسطة فإنه تتكون صخور تعرف بصخور الشست الأزرقblueschists . وتكتسب هذه الصخور اسمها من وجود معدن الجلوكوفين glaucophane، وهو معدن أمفيبول أزرق (يتميز بوجود نسبة من الصوديوم) ، بالإضافة إلى معادن الكيانيت ولاوسونيتlawsonite كما أسلفنا سابقا . ومازال هناك صخر متحول آخر يتكون عند أقصى درجات الضغط ، ودرجات حرارة تتراوح بين متوسطة إلى عالية ، وهو صخر الإكلوجيت eclogite الغنى فى معدنى الجارنت والبيروكسين .

جـ. سحنات التحول

لقد أوضحت الدراسات الدقيقة للصخور المتحولة فى جميع أنحاء العالم ، أن التركيب الكيميائى لمعظم الصخور يتغير قليلاً أثناء التحول. وتتمثل التغيرات الرئيسية التى تحدث فى إضافة أو فقد بعض المواد المتطايرة، مثل: الماء H_2O وثانى أكسيد الكربون CO_2 . أما المكونات الرئيسية مثل : SiO_2 وAl_2O_3 وCaO وK_2O ، فإنها تبقى ثابتة . كما أوضحت تلك الدراسات أن التغيرات التى تحدث أثناء التحول هى تغيرات فى تجمعات المعادن وليس فى التركيب الكيميائى العام للصخور. ولقد أدت هذه الملحوظة إلى استنتاج أن تجمعات المعادن فى الصخور المتحولة

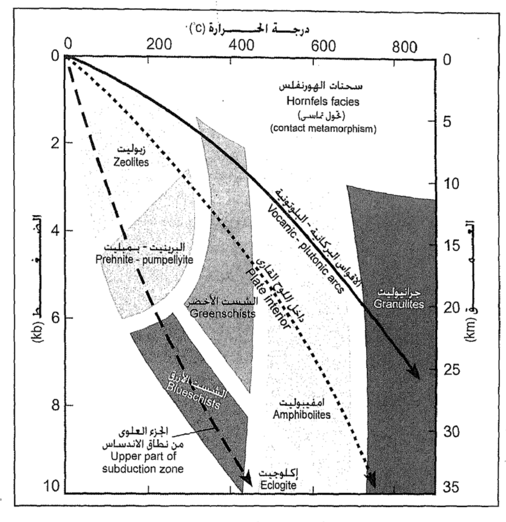
والمستمدة من الصخور النارية والرسوبية الشائعة يجب أن تتحدد بدرجات الحرارة والضغوط التى تعرضت لها هذه الصخور خلال عملية التحول . واعتماداً على هذه النتيجة ، فقد اقترح العالم الفنلندى الشهير إسكولا فى عام 1915 م مفهوم **السحنات المتحولة metamorphic facies** . ويدل هذا المفهوم على أن كل مجموعة معادن تمثل تركيب صخر معين تصل إلى حالة اتزان أثناء التحول ، وفى مدى معين من الظروف الطبيعية لابد أن تنتمى إلى سحنة التحول نفسها . وقد بنى إسكولا نتائجه على دراسة صخور البازلت المتحولة ، والتى كانت موجودة بين تتابع من الطبقات مختلفة التركيب تماما. والنقاط الأساسية فى مفهوم سحنات التحول هى:

1- كل الصخور التى لها التركيب الكيميائى نفسه تعطى التجمع نفسه من المعادن نتيجة التفاعل بين المعادن فى السحنة الواحدة ، ويتغير التجمع المعدنى عند الانتقال من سحنة إلى أخرى نتيجة التفاعل بين المعادن (للتركيب الكيميائى نفسه).

2- تتكون الأنواع المختلفة من الصخور المتحولة نتيجة تحول صخور أصلية ذات تركيب كيميائى مختلف عند رتبة التحول نفسها . ويبين جدول (3.8) قائمة بالمعادن الرئيسية لسحنات التحول المتكونة من صخور البازلت والطفل. ويوضح شكل (15.8) أن الحدود بين جميع سحنات التحول متدرجة وتقريبية ، بينما يوضح شكل (16.8) توزيع سحنات التحول عبر حد لوح متقارب .

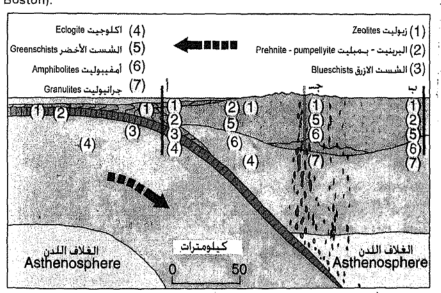
جدول(3.8): المعادن الرئيسية المميزة لسحنات التحول الناتجة من صخور أصلية مختلفة التركيب

السحنة Facies	الصخر الأصلى Parent rock	
	بازلت	طفل
جرانيوليت Granulite	هورنبلند، بيروكسين (غنى بالكالسيوم)، بلاجيوكليز (غنى بالكالسيوم)	بيوتيت ، فلسباربوتاسى ، كوارتز ، سيليمانيت ، جارنت
أمفيبوليت Amphibolite	أمفيبول،بلاجيوكليز،جارنت، كوارتز	جارنت،بيوتيت ، مسكوفيت ، كيانيت أو سيليمانيت، كوارتز
الشست الأخضر Greenschist	كلوريت، أمفيبول، بلاجيوكليز صودى،إبيدوت	كلوريت، مسكوفيت ، بلاجيوكليز (غنى بالصوديوم) ، كوارتز
الشست الأزرق Blueschist	جلوكوفين (أمفيبول صودى) أزرق ، كلوريت ، كيانيت ،لاوسونيت	أمفيبول أزرق ،كلوريت ،كوارتز ، مسكوفيت ، لاوسونيت
إكلوجيت Eclogite	بيروكسين (غنى بالصوديوم)، جارنت، كيانيت	جارنت، بيروكسين (غنى بالصوديوم)، كوارتز
هورنفلس Hornfels	بيروكسين ، بلاجيوكليز	أندالوسيت ، بيوتيت ، فلسبار بوتاسى، كوارتز
زيوليت Zeolite	كالسيت ، كلوريت ، زيوليت	زيوليت ، بيروفيليت ، ميكا صودية
برينيت – بمبليت Prehnite-Pumpellyite	كلوريت ، برينيت ، بلاجيوكليز صودى ، بمبليت، إبيدوت	كوارتز ، صلصال ، بلاجيوكليز صودى ، كلوريت



شكل (**15.8**): السحنات المتحولة . تسمى السحنات بأسماء معادن أو أنواع صخرية شائعة فى تلك السحنات . وتكون الحدود بين جميع سحنات التحـول متدرجة وتقريبية . كما تمثل الأسـهم الزيادة فى درجة الحرارة مع زيادة العمق فى ثلاثة مواضع تكتونية تمثلها الخطوط أ و ب و ج فى شكل (**16.8**).

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).



شكل (**16.8**): شكل يوضح توزيع سـحنات التحـول عـبر حـد لـوح متقـارب. وتمثـل الخطـوط الرأسـية الثلاثـة التـدرج الحـرارى فى ثلاثـة مواضع تكتونية وهى :

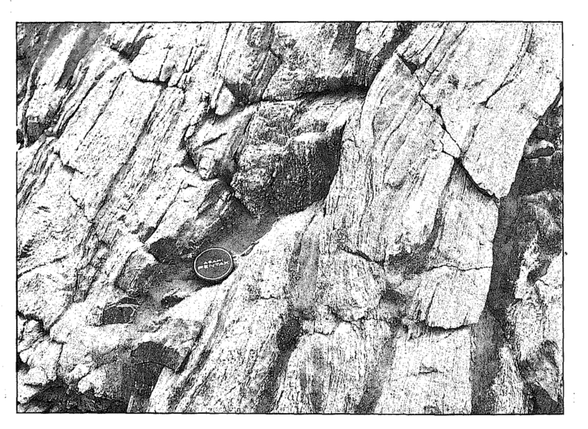
أ) الجزء العلوى من نطاق الاندساس.
ب) داخـل حـدود اللـوح القـارى .
جـ) الأقواس البركانية - البلوتونية .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

وحيث إن مفهوم السحنات المتحولة الذى اقترحه إسكولا كان يقوم على دراسة صخور البازلت المتحولة، فإن معظم الأسماء التى أعطيت للسحنات المتحولة تعكس تجمعات معدنية تكونت من صخور ذات تركيب بازلتى ، مثل سحنة الشست الأخضر ، إلا أن هناك بعض السحنات التى تعرف بأسماء صخور أخرى مثل الجرانيوليت ، أو بعض المعادن الشائعة فى تلك السحنات ، مثل : سحنة الزيوليت والبرينيت والبمبليت (شكل 15.8).

ويماثل مفهوم السحنات المتحولة تحديد النطاقات المناخية بواسطة بعض التجمعات النباتية فى كل نطاق مناخى ؛ فيقابل النطاق الذى تنتعش فيه السراخس ferns وأشجار النخيل والعنب مناخا يتميز بدرجات حرارة دافئة وأمطار غزيرة ، بينما يتطلب التجمع النباتى المكوّن من أشجار النخيل والصبار وكف مريم (نبات عطرى الرائحة) sagebrush مناخا حارا جافا .

ويلاحظ أنه عند نهاية الحد الأعلى للسحنات عالية الرتبة ، فإن الصخور المتحولة تنصهر جزئياً فى مرحلة انتقالية إلى صخور نارية . وهذه الصخور تكون مشوهة (معقوصة) ومطوية بقوة ويتخلله عديد من العروق، ويكون الصخر المنصهر على هيئة أجسام قرنية صغيرة وعدسية الشكل . ويسمى هذا النوع من النيس الذى تتخلله العروق، والمتحول عند رتبة تحول عالية جدا



شكل (**17.8**): مجماتيت **migmatite** ، يتكون من خليط من طبقات داكنة اللون (صخور متحولة تتكون أساسا من بيوتيت وهورنبلند) من أجسام تكون عدسية مشوهة ومتداخلة مع طبقات فاتحة اللون من صخر نارى (فلسبارات وكوارتز) . وقد تحول الصخر الأصلى وتشوه بشدة بينما تكونت الطبقات فاتحة اللون فى مرحلة لاحقة شرق وادى سيكيت . الصحراء الشرقية - مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية).

بالميجماتيت migmatite (شكل 17.8)، وهو مصطلح يطلق على خليط من الصخور النارية والمتحولة . وتتكون بعض الميجماتيت من الصخور المتحولة مع وجود نسبة صغيرة من الصخور النارية ، بينما تتعرض بعض أنواع الميجماتيت الأخرى للانصهار لدرجة أنه يمكن اعتبارها صخورًا نارية تقريبا .

VI. نطاقات التحول بالتماس

يمكن مشاهدة تأثير التحول لجسم نارى متداخل عند مكشف صخر الطفل المقطوع بقاطع dyke أو تتواجد بين طبقاته جدة موازية sill . وعند حدود تلامس الطفل مع القاطع ، فإن الطفل يمكن أن يفقد كل نسيجه الأصلى ، حيث يختفى التطبق وتنطمس الحفريات ويتغير التركيب المعدنى للطفل تمامًا . ويتكون الصخر الملاصق تمامًا للقاطع من بلورات كبيرة من البيروكسين أو معادن ألومينوسيليكاتية مثل الأندالوسيت، والتى لا توجد فى معادن الصلصال دقيقة التحبب مثل الطفل والصخور الرسوبية عموما . وبعيدا قليلاً عن سطح التلامس ، أى من عدة سنتيمترات إلى متر واحد ، فإن حدود التطبق للطفل يمكن رؤيتها ولكنها تكون ضعيفة ، كما يمكن ملاحظة أن معادن الصلصال قد تغيرت إلى ميكا متبلورة. وعلى مسافة أبعد من سطح التلامس ، يكون الطفل غير متغير تماما . وهكذا ، فإن نطاقات الصخور المتحولة بالتماس تكون مميزة بمعادن دالة ، تعكس رتب التحول المختلفة ، مثلها فى ذلك مثل الصخور المتحولة إقليميا .

أ. هالات التحول (هالات التماس)

تسمى المنطقة من الصخور المتحولة المجاورة للمتداخل النارى بهالة التحول metamorphic aureole أو هالة التماس contact aureole (شكل 5.8). ويعتمد سمك وخصائص هالة التحول على درجة حرارة الصهارة وعمق الصهارة المتداخلة فى القشرة الأرضية . وتكون هالة التماس أوضح كثيرا عندما يتداخل جسم مافى ، مثل تداخل الجابرو ، وتصل درجة حرارته إلى نحو 1000°م فى صخور القشرة على بعد كيلومترات قليلة بالقرب من السطح ، حيث تتراوح درجة الحرارة بين نحو 60° إلى 90°م. وفى هذا النوع من التحول ، فإن درجة الحرارة تكون عالية جدا عند حد التماس ، ولكنها تنخفض بسرعة إذا ابتعدنا عن هذا الحد . أما المتداخلات عند درجات حرارة أقل ، مثل تداخل الجرانيت عند نحو 600°م ، فإنها تتداخل فى الأجزاء الأعمق من القشرة الأرضية حيث تكون درجة الحرارة مرتفعة . ولذلك لاتسبب هذه المتداخلات ارتفاعًا كبيرًا فى درجة حرارة الصخور المحيطة ، وبالتالى تكون التغيرات التحولية أقل .

ب. رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلى

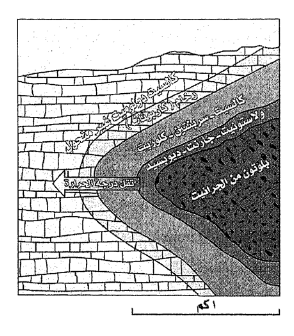
تختلف نطاقات التحول بالتماس باختلاف أنواع الصخور الأصلية التى تكون مماسة للمتداخلات الساخنة. وعلى الرغم من أن الرسم التخطيطى لسحنات التحول مثل تلك الموضحة فى شكل (15.8) لاتضم الصخور المتحولة بالتماس ، إلا أن هذه الصخور تظهر العلاقة نفسها بين رتبة التحول وتركيب الصخر الأصلى ؛ حيث تختلف أنماط رتب تحول المعادن التى يبديها الحجر الجيرى غير النقى ، والذى يتكون أساسا من معادن الكربونات ، عن تلك الأنماط التى يبديها الطفل ، والذى يتكون فى معظمه تقريبا من معادن سيليكاتية . فعند تعرض صخور حجر جيرى غير نقى للتحول بالتماس ، فإن معادن الكربونات تتفاعل مع شوائب السيليكا فى الصخر لتكوّن معدن ولاستونيت

wollastonite، وهو معدن فاتح يحتوى على الكالسيوم ويشبه معدن البيروكسين .

كالسيت $(CaCO_3)$ + سيليكا (SiO_2) →

ثانى أكسيد الكربون (CO_2) + ولاستونيت $(CaSiO_3)$

ويهرب ثانى أكسيد الكربو ن الناتج عن هذا التفاعل فى صورة غاز عبر الشقوق والمسام فى الصخور. ويحدث هذا التفاعل عند درجات حرارة نحو 500°م وضغوط قريبة من سطح الأرض ، أو عند درجات حرارة أعلى نتيجة زيادة الضغط . وهكذا، فإن وجود معدن الولاستونيت يعتبر دليلاً على رتبة تحول صخر المصدر ، والذى تكون الكربونات هى المكوّن الأساسى له . ويوجد معدن الولاستونيت الذى يتكون عند درجات الحرارة الأعلى مع معدن الجارنت (شكل 18.8) ومعدن الديوبسيد (بيروكسين يحتوى على الكالسيوم والماغنسيوم) بالقرب من حدود التماس. فإذا ابتعدنا عن حدود التماس مع الجرانيت ، فإننا نجد نطاقًا يحتوى على السربنتين (سيليكات ماغنسيوم يحتوى على الماء المرتبط كيميائيا) مع الكلوريت والكالسيت . فإذا ابتعدنا أكثر ، نجد نطاقات تحول عند درجات حرارة أقل ، تتكون من صخر الرخام الخالى من السيليكات ويحتوى على الكالسيت والدولوميت . وبعد هذا النطاق لا تظهر أية آثار للتحول فى الحجر الجيرى . وقد يبلغ عرض الهالة الكاملة عدة مئات من الأمتار. وجدير بالملاحظة أنه يمكن حدوث تبادل كيميائى واضح فى هالة التحول بين الجسم النارى المتداخل والصخور المحيطة بها . لذلك فإن هذه العملية يمكن اعتبارها نوعًا من **عملية التحول metasomatism** ، والتى كما ذكرنا سابقا تؤدى إلى تغير كيميائى فى تركيب الصخر الكلى.



شكل (**18.8**): التحول التماسى **contact metamorphism** لحجر جيرى مكوّن من الكالسيت والدولوميت ، مع شوائب من الكوارتز ومعادن الصلصال . يسبب التحول تكون هالة تماس **contact aureole** مكوّنة من عدة نطاقات من المعادن . وتتدرج تلك النطاقات ، كلما اقتربنا من حدود التماس مع الجرانيت ، من صخر كربونات غير متحول خال من السيليكات إلى رخام مكوّن من كربونات إلى شرائط بها معادن مختلفة من سيليكات الكالسيوم والماغنسيوم .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويؤدى التحول بالتماس للصخور السيليكاتية مثل الطفل إلى **التحول التدريجى (التقدمى) progressive metamorphism** ، أى تكوّن نطاقات معادن متنامية ، تظهر تغيرا متصلا ومستمرا فى رتبة التحول ، إلا أن مجموعة المعادن المتكونة تختلف عن تلك التى تظهر فى صخور الحجر الجيرى المتحولة . فيوجد عند حدود التماس صخور الهورنفلس التى تحتوى على البيروكسين والميكا . وتوجد فى النطاقات الداخلية القريبة من حرارة الصخور المتداخلة ، معادن من سيليكات الألومنيوم النقية مثل معدن السيليمانيت (Al_2SiO_5) المميز . بينما فى النطاقات الخارجية الأقل

فى درجة الحرارة ، تتحول معادن الكوارتز والصلصال والكربونات فى الطفل إلى معادن ميكا البيوتيت والأندالوسيت والأمفيبول والكالسيت . وفى النطاقات الخارجية الأبعد ، تتكون معادن الكلوريت والمسكوفيت . وهذا النوع من هالات التحول لا يحتوى على أى تبادل كيميائى فى هالات التحول بين المتداخل النارى والصخور المحيطة . وبذلك لا يوجد تغير فى التركيب الكيميائى الكلى للصخور، أى لاتوجد عملية تحوال للصخور. وتوضح الخريطة المبسطة لبلوتون أم حاد الجرانيتى بالصحراء الشرقية بمصر التوزيع التقريبى لنطاقات التحول حول البلوتون (شكل 19.8).

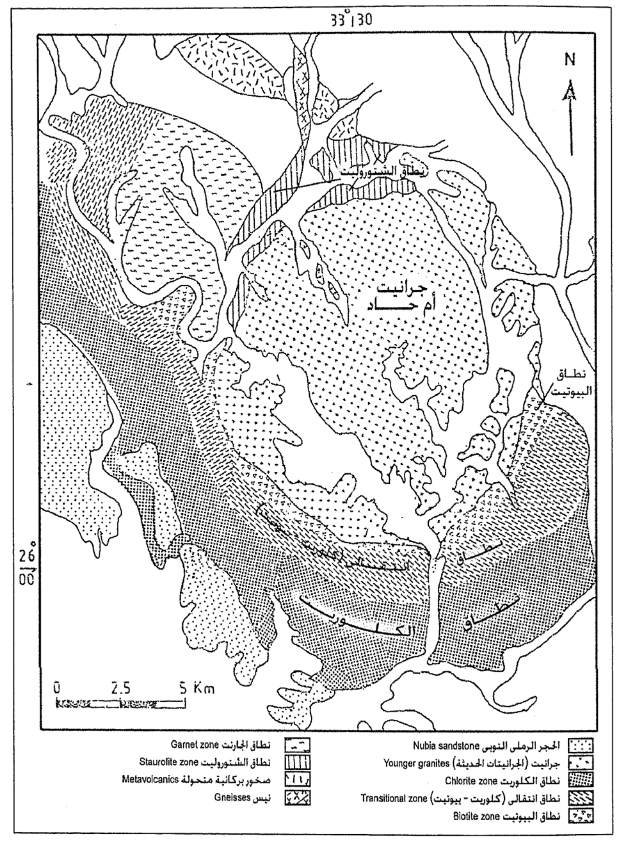
VII. التحول وتكتونية الألواح

إن أحد النجاحات التى أحرزتها نظرية تكتونية الألواح ، أنها أمدتنا للمرة الأولى بتفسير لتوزيع نطاقات الصخور المتحولة فى الصخور المتحولة إقليميا. وقد أوضحنا عند بداية هذا الفصل العلاقة بين الأوضاع التكتونية المختلفة والعمليات الجيولوجية (مثل النشاط البركانى ونشأة الجبال) التى تسبب الأنواع المختلفة من التحول (شكل 3.8). كما يمكننا أيضا أن نستنتج موقع الصخر فى التحول ، على أساس رتبة التحول والتركيب .

وترتبط صخور الحجر الأخضر greenstones ، والتى تنتج عن تحول صخور نارية مافية مثل صخور البازلت والجابرو بالتحول الحرمائى عند حيود وسط المحيط أثناء تباعد الألواح . فعندما يحدث انتشار لقيعان المحيطات وتصعد الصهارة البازلتية من الوشاح تحوّل حرارة الصهارة صخور البازلت المنبثقة حديثا فى وجود الماء إلى صخور متحولة ذات رتبة تحول منخفضة تتبع سحنة الشست الأخضر . ويلعب دوران السوائل الحرمائية خلال البازلت دورا مهمًا فى تحول صخور البازلت ، حيث يتفاعل الماء مع المعادن اللامائية وتتكون معادن مافية مثل الكلوريت والسربنتين . كما يحل الصوديوم الموجود فى الماء محل الكالسيوم فى معدن البلاجيوكليز الموجود فى صخور البازلت .

ويوضح شكلا (3.8 و 16.8) أن التحول الإقليمى يكون عند حد الاندساس للوح الهابط أثناء تقارب الألواح . فعندما تهبط الصخور المتبلورة لأسفل باللوح المندس بسرعة (نحو 1 سم/ عام) فإن الضغط يزداد تحت تلك الظروف عن درجة الحرارة بسرعة ، ويتعرض الصخر لضغط عال ودرجة حرارة منخفضة نسبيا ، وهى الضغوط ودرجات الحرارة المميزة لسحنة الشست الأزرق blueschist. ومن المحتمل أن تحول الشست الأزرق يحدث حاليا على امتداد الحافة الهابطة للوح الهادئ ، حيث يندس تحت شاطىء ألاسكا وجزر اليوشان . ويتكون عند أعماق أكبر سحنة الإكلوجيت eclogite حيث تكون درجة الحرارة أكثر ارتفاعا .

وتتواجد الظروف المميزة لسحنتى الشست الأخضر والأمفيبوليت عندما يزيد سمك القشرة القارية نتيجة التصادم القارى ، أو ارتفاع درجة الحرارة بواسطة الصهارة الصاعدة . ويعتبر التصادم القارى أكثر مناطق التحول الإقليمى شيوعًا ، حيث يمكن رؤية مساحات عريضة من الصخور المتحولة إقليميا فى جبال الأبلاش والألب . كما يتميز عديد من المناطق فى مصر والمملكة العربية السعودية بوجود عدة مناطق متحولة إقليميا مثل منطقة حفافيت بالصحراء الشرقية المصرية ووادى فيران ووادى الشيخ بسيناء . ويحدث مثل هذا التحول حاليا تحت جبال الهيمالايا ، حيث يزداد سمك القشرة القارية نتيجة التصادم ،



شكل (**19.8**): خريطة مبسطة توضح التوزيع التقريبى لنطاقات التحول حول بلوتون منطقة أم حاد – الصحراء الشرقية – مصر .

(After El Kalioubi, B. A., 1988: Deformation events, mineral facies and metamorphic conditions in the contact aureoles of the Hammamat Group around Um Had pluton, Central Eastern Desert, Egypt. M.E. R. C. Ain Shams Univ., Earth Sc. Ser., 2, 172-190pp).

وتحت جبال الأنـديز حيـث يـزداد سـمك القـشرة الأرضية وترتفع درجة حرارتها من الصهارة الصاعدة. أما الأجزاء العميقة من القشرة القارية ، فإنهـا تـسخن وتتحول إلى رتب مختلفة نتيجة تصادم القارات وزيـادة سمك الغلاف الصخرى ، بينما يبدأ الانـصهار الجزئـى الرطب فى النطاقـات الأعمـق حيـث تتكـون صـخور الميجماتيت ، وقد تستمر العمليـة لتـصل إلى الانـصهار الكامل وتكوّن الصهارة . وبهذه الطريقـة ينـشأ خلـيط معقد من الـصخور المتحولـة والناريـة فى لـب أحزمـة التجبل orogenic belts ، التـى تنـشأ خـلال عمليـة تكون الجبال . وعندما تقـوم التعريـة بإزالـة الطبقـات السطحية بعد ملايـين الـسنين ، ينكـشف لـب أحزمـة الجبال على السطح ؛ مما يـؤدى إلى إمـداد الجيولـوجيين بسجل صخرى لعمليات التحول التى كونت الشـست والنيس وصخور متحولة أخرى .

وترتبط أيـضا عمليـة التحـوال metasomatism ونشأة المحاليل الحرمائية بتكتونية الألـواح ، نظـرا لأن التحوال يرتبط بالتحول الإقليمى والنشاط الصهارى . ويوضـح شـكل(11.19) مثـالا لتوزيـع رواسـب النحاس الغنية بمعدن الكالكوبيريت فى أمريكا الشمالية والجنوبيـة، حيـث يمكـن تمييـز حـزام مـن الرواسـب المعدنية المتكونة فى/ أو مرتبطة ببراكين طباقية قديمة تمتد على الحافة الغربية للأمريكتين . وقد نشأت الـصهارات التى كونت البراكين الطباقية نتيجة للانـصهار الجزئـى الرطب لقشرة محيطيـة مندسـة ، بالإضـافة إلى صـخور الوشاح المتواجدة فوقها . كما كانت الصهارات مصدرا لحرارة المحاليل الحرمائية ، والتـى أدت إلى تحـول تلـك الصخور المجاورة لها ، والتى انسابت خلالهـا المحاليـل لتكوّن رواسب الخامات . كما يوجد التحول الحرمـائى مصاحبا لمراكز الانتشار أيضا عند حيود وسـط المحـيط أى عند حواف القارات المتباعدة .

ويعتقد أن التحول بالدفن يوجد فى الأجزاء الـسفلى من التراكمات الـسميكة للرواسـب التـى تـتراكم عـلى الرفوف والمنحدرات القارية . ومـن المعـروف أن مثـل هذا التحول يحدث اليوم فى التراكم الضخم للرواسـب فى خليج المكسيك .

الملخص

1. ينتج التحول ، وهو تغير التركيب المعـدنى والنـسيج فى الحالة الصلبة ، لـصخور سـابقة التكـوين نتيجـة زيادة فى الضغط ودرجات الحرارة والتفاعل أحيانـا مـع مكونـات كيميائيـة تـداخلت مـن المحاليـل المتحركة . وتؤدى زيادة الضغط ودرجة الحـرارة إلى تغـيرات فى النـسيج ، كـما أن المكونـات الكيميائيـة للـصخر الأصـلى تعيـد ترتيـب نفـسها فى مجموعـة جديدة من المعادن تكـون مـستقرة تحـت الظـروف الجديدة .
2. تعـرف الـصخور المتحولـة عنـد درجـات حـرارة وضغوط منخفـضة نـسبيا بأنهـا صـخور منخفـضة الرتبة ، بينما يشار إلى الصخور المتحولة عند درجات حرارة وضغوط مرتفعة بأنها صخور عالية الرتبـة . وقد يـضاف أو يـزال بعـض المكونـات الكيميائيـة للصخر خلال عملية التحول ، ويحدث ذلك غالبًـا نتيجة تأثير السوائل المنتقلة من المتداخلات القريبة .
3. هناك نوعان رئيسيان من التحول ، هما : أ – التحـول الإقليمى ، والذى تتحول خلالـه مـساحات كبـيرة من القشرة الأرضية نتيجة ضغوط ودرجات حرارة عالية تنـشأ خـلال عمليـات بنـاء الجبـال . وينـتج التحول الإقليمى على امتـداد نطاقـات الاندسـاس وحواف الألواح المتصادمة. ب – التحول التماسـى (التحـــول الحـــرارى) ، والـــذى تتحـــول خلالـــه الصخور المحيطة بالصهارات أساساً بواسطة حرارة

الجسم النارى حيث تتكون هالات التحول . ويشمل التحول التماسى إعادة التبلور ، بينما ينعدم تقريبا التشوه الميكانيكى .

4. هناك ثلاثة أنواع إضافية من التحول وهى:

أ - تحول تهشمى ؛ حيث تطحن الصخور على امتداد مستويات الصدوع وقد تتغير معدنيا .

ب - تحول حرمائى ، ويحدث نتيجة تخلل المحاليل الساخنة لصخور القشرة المختلفة لتحولها.

ج - تحول بالدفن، وهو نوع من التحول الإقليمى تتغير خلاله الصخور الرسوبية المدفونة فى الأعماق نتيجة الزيادة الطبيعية فى ضغط وحرارة القشرة .

5. تقسم الصخور المتحولة إلى قسمين رئيسين تبعا للنسيج ، هما:

أ. الصخور المتحولة المتورقة (وهى التى تبدى الانفصام الإردوازى والشستوزية أو أى شكل من أشكال التوجيه المفضل) .

ب. جرانوبلاستية (غير متورقة) .

6. تشمل الصخور المتورقة صخور الإردواز والفيليت والشست والنيس .

7. تشمل الصخور الجرانوبلاستية (غير المتورقة) أنواعا عدة ، منها : الرخام الذى يتكون من تحول الحجر الجيرى ، والكوارتزيت الذى يتكون من الحجر الرملى الغنى بالكوارتز، والأرجيليت الذى يتكون من حجر الطين ، والحجر الأخضر الذى يتكون من البازلت . وتتكون صخور الهورنفلس نتيجة التحول التماسى لصخور رسوبية دقيقة التحبب ، وأنواع أخرى من الصخور تحتوى على وفرة من المعادن السيليكاتية.

8. تتفاعل الصخور التى لها التركيب الكيميائى نفسه عند تعرضها لظروف التحول المتشابهة لتكوّن نفس التجمعات من المعادن . ويحدد كل تجمع معدنى سحنة تحولية معينة تمثل مدًى محددا من الضغط ودرجة الحرارة .

9. يشمل التحوال مجموعة التغيرات التى تحدث فى التركيب الكيميائى للصخر عندما تضاف عناصر كيميائية ذائبة فى المحاليل ، أو عندما يفقد الصخر بعض العناصر أثناء تخلل المحاليل فى مسامه .

10. يمكن شرح الأنواع المختلفة للتحول من خلال نظرية تكتونية الألواح ؛ فالتحول بالدفن يوجد فى الأجزاء السفلية من تراكمات الرواسب عند الرفوف والمنحدرات القارية ، بينما نجد التحول الإقليمى عند نطاقات الاندساس والتصادم عند حواف القارات المتقاربة . ويوجد التحول الحرمائى مصاحبا لمراكز الانتشار عند حيود وسط المحيط أى عند حواف القارات المتباعدة ، كما يوجد أيضا فى القارات نتيجة للسوائل الحرمائية الصاعدة من المتداخلات النارية . أما التحول التماسى فينتج بسبب الحرارة المنبعثة من الصهارات المتداخلة فى أعماق ضحلة نسبيًّا أو قريبة من سطح الأرض .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/metpet.html
http://www.geolab.unc.edu/Petunia/IgMetAtlas/meta-micro/metamicro.html
http://www.cobweb.net/~bug2/rock5.htm
http://www.gly.bris.ac.uk/www/jmg/JMG.html

المصطلحات المهمة

English	العربية
amphibolite	أمفيبوليت
argillite	أرجيليت
back-arc basin	حوض خلف قوس
blueschist	شست أزرق
burial metamorphism	تحول بالدفن
calc-schist	شست كلسي
cataclastic metamorphism	تحول تهشمي
confining pressure	ضغط حابس
contact aureole	هالة التماس
contact metamorphism	تحول تماسي
differential stress	إجهاد متباين
directed pressure	ضغط موجه
eclogite	إكلوجيت
foliation	تورق
fore-arc basin	حوض أمام قوس
gneiss	نيس
gneissosity	نيسوزية
granoblastic texture	نسيج جرانوبلاستي
granulite	جرانيوليت
greenschist	شست أخضر
greenstone	حجر أخضر
high-grade metamorphism	تحول عالي الرتبة
hornfels	هورنفلس
hydrothermal metamorphism	تحول حرمائي
hydrothermal solution	محلول حرمائي
index mineral	معدن دال
isograd	أيزوجراد (خط تساوي رتب التحول)
lineation	تخطيط
low-grade metamorphism	رتبة تحول منخفضة
marble	رخام
metamorphic aureole	هالة التحول
metamorphic facies	سحنة تحول
metamorphic rocks	صخور متحولة
metamorphic zones	نطاقات تحول
metamorphism	تحول
metasomatism	تحوال
migmatite	ميجماتيت
mylonite	ميلونيت
nonfoliated	صخور غير متورقة
phyllite	فيلليت
porphyroblast	بورفيروبلاست
porphyroclast	بورفيروكلاست
preferred orientation	توجيه مفضل
prograde metamorphism	تحول متصاعد
progressive metamorphism	تحول تدريجي
quartzite	كوارتزيت
regional metamorphism	تحول إقليمي
retrograde metamorphism	تحول تراجعي
schist	شست
schistosity	شستوزية
serpentinite	سربنتينيت
slate	إردواز
slaty cleavage	انشقاق إردوازي
soapstone	حجر الصابون
talc schist	شست تلكي
thermal metamorphism	تحول حراري (تحول تماسي)
uniform stress	إجهاد منتظم
zeolite	زيوليت

الأسـئلة

1- اذكر أنواع التحول المرتبطة بالمتداخلات النارية.

2- اذكـر أنـواع التوجيـه المفـضل للمعـادن ، التـى يمكن توقع وجودها فى الأمفيبوليت.

3- اذكـر اسـم معـدن شـائع التواجـد فى صـخر الشست ، والذى يسبب التوجيه المفضل .

4- اذكر اسـم صخرين متحـولين غـير متـورقين . ما البورفيروبلاست ؟

5- اشرح معنى الأيزوجراد .

6- ما الفـرق بـين صخـر الكوارتزيـت والحجـر الرملى ؟

7- كيف ترتبط سحنات التحول بدرجات الحـرارة والضغط ؟

8- فى أى أوضاع تكتونيـة الألـواح يحتمـل وجـود التحول الإقليمى ؟

9- عند رسـم خريطـة لـصخور متحولـة ، لـوحظ وجود خطوط أيزوجـراد ممتـدة مـن الـشمال إلى الجنوب ، وكانت المعادن الدالة هى الكيانيت فى الـشرق إلى الكلوريـت فى الغـرب . اذكـر هـل درجات حـرارة التحـول أعـلى فى الـشرق أم فى الغرب ؟

10- ماالـذى يحـدد تكـوّن أى معـدن مـن المعـادن متعـددة الـشكل لـسيليكات الألومنيـوم Al_2SiO_5 فى الصخور المتحولة ؟

11- قارن بين المعادن التى تتكون نتيجة التحول التماسـى لحجـر جـيرى نقـى ، وحجـر جـيرى يحتـوى عـلى طبقات من الطفل .

12- اذكر نوع التداخل النارى الـذى يـسبب أعـلى رتبـة تحول ، وهل هو متداخل جرانيتى عند عمق 20 كم أو متداخل من الجابرو عند عمق 5 كم ؟

13- لماذا لا يمكن توقع وجود صـخور متحولـة بالـدفن عند حيود وسط المحيط ؟ اقترح بعض الأماكن التى يحتمل تواجد التحول بالدفن فيها اليوم.

14- أين يمكن توقع تواجد الصخور المتحولة التهشمية، فى وادى خسف قارى أم فى قوس بركانى ؟

15- لماذا لا توجد صخور متحولة تحت الظروف العاديـة المنخفضة جدا من الضغط ودرجة الحرارة؟

16- اذكر أسماء ثلاثة معـادن تتواجـد فقـط فى الـصخور المتحولة .

17- كيف يختلف الشست عن النيس ؟

18- تحت أى ظروف من الضغط ودرجة الحرارة يمكـن أن تتواجد سحنات الشست الأزرق؟. اذكـر البيئـة الجيولوجية التـى تتواجـد فيهـا تلـك العوامـل مـن الضغط ودرجة الحرارة . اقترح بعض الأماكن التـى يمكن أن يحدث فيهـا تحـول الشـست الأزرق عـلى الكرة الأرضية حاليا .

الفصل 9

الزمن الجيولوجى

I. العمر النسبى :

أ. السجل الطبقى (الاستراتجرافى) :

1. القواعد الأساسية لتحديد العمر النسبى

2. عدم التوافق

II. مضاهاة الوحدات الصخرية

III. العمر المطلق :

أ. أسس التقدير الإشعاعى

ب. الاضمحلال الإشعاعى

جـ. سلاسل الاضمحلال الإشعاعى

د. تحديد العمر باستخدام الكربون المشع

هـ. تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار

و. تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية

IV. العمود الجيولوجى ومقياس الزمن الجيولوجى :

أ. بناء مقياس الزمن الجيولوجى

ب. مشكلات تحديد الأعمار فى مقياس الزمن الجيولوجى

V. التصنيف الطبقى (الاستراتجرافى)

يختلف الجيولوجيون ، وكذلك علماء الفلك ، عن معظم بقية العلماء فى تعاملهم مع الزمن ؛ فالفيزيائيون والكيميائيون يقومون بدراسة عمليات تدوم لفترة تقل عن كسور الثانية ، بينما يقوم آخرون بإجراء تجارب تستمر من بضع دقائق إلى عدة ساعات . وعلى العكس من ذلك فإن الجيولوجيين يتعاملون مع مدى واسع من الزمن . فالهزات الأرضية تستمر لثوان أو لدقائق ، بينما يمتد بناء الجبال لعدة ملايين من السنين . ويتعامل الجيولوجيون مع نوعين من الزمن: زمن نسبى وزمن مطلق . ويعرف **الزمن النسبى relative time** بأنه ترتيب الأحداث الماضية ترتيبا زمنيا حسب ترتيب وقوعها . أما **الزمن المطلق absolute time** فهو الزمن المقدر بالسنوات منذ وقوع حدث ما . ويشبه تحديد العمر النسبى معرفة أن الحرب العالمية الأولى سبقت الحرب العالمية الثانية . أما العمر المطلق فهو معرفة عدد السنين منذ أن بدأت وانتهت كل منهما .

وقد كان جيمس هاتون James Hutton أول من فهم المعنى الحقيقى للزمن النسبى فى الجيولوجيا . ولم يكن لدى هاتون أية وسيلة لقياس الزمن المطلق فى تاريخ الأرض ، ولكن استطاع هاتون أن يثبت أن تتابع الأحداث الجيولوجية القديمة فى أسكتلندا قد حفظ فى السجل الصخرى ، حيث يمكن استخدام الصخور التى تكونت فى الماضى وحفظت من التعرية كذاكرة للأرض لتسجيل الأحداث الجيولوجية الماضية . وقد استطاع تشارلز ليل Charles Lyell ، وهو أسكتلندى الأصل مثل هاتون ، استخدام اكتشاف هاتون لتحديد العمر النسبى لكل الأحداث الجيولوجية . وقد أدرك ليل أن بعض العمليات الجيولوجية البطيئة مثل التعرية ، تعنى أن الزمن الجيولوجى النسبى تقابله فترات زمنية مطلقة ضخمة . ولم يستطع ليل أن يتخطى هذا التفكير بالنسبة للزمن الجيولوجى ؛ حيث كانت تنقصه وسيلة تقدير العمر المطلق مثل هاتون ؛ نظرًا لأن النشاط الإشعاعى (إشعاع ذرى) ، وهو الطريقة الدقيقة لتقدير الزمن المطلق ، لم يكن قد اكتشف بعد . والنشاط الإشعاعى هو ساعة طبيعية تدق باستمرار فتترك سجلا محفوظا لهذه الدقات فى الصخور . ولقد أظهر سجل الساعة الإشعاعية أن عمر الأرض يقدر بـ 4.6 بليون سنة . وهذا العمر الزمنى الجيولوجى أكبر بكثير جدا مما تخيله ليل أو أى من رفاقه . لذلك فإن إدراك هذا الامتداد الزمنى الطويل جدًّا يعتبر عملية صعبة جدًّا ؛ لأننا نقيس الزمن منسوبًا لعمر الإنسان ، وهو ما يمثل مجرد لحظة فى الزمن الجيولوجى . وهناك وسيلة لإدراك طول الزمن الجيولوجى استخدمها دون إيشر Don L. Eicher عام 1968 م فى كتابه "الزمن الجيولوجى". حيث مثَّل كل الزمن الجيولوجى وهو 4.6 بليون سنة بسنة ميلادية واحدة طولها اثنا عشر شهرا . تمتد من يناير حتى ديسمبر ، ويكون ترتيب الأحداث الجيولوجية المهمة، خلال هذه السنة، على النحو التالى :

- الفترة من أول شهر يناير حتى منتصف شهر مارس ، فترة مفقودة من تاريخ الأرض .
- يرجع عمر أقدم الصخور على وجه الأرض إلى منتصف شهر مارس .
- خلق أقدم كائن على وجه الأرض فى البحار فى شهر مايو .

- انتقلت النباتات والحيوانات إلى اليابس فى نهاية شهر نوفمبر .
- تكونت رواسب الفحم السميكة فى أوروبا وأمريكا فى بداية شهر ديسمبر .
- وصلت الديناصورات إلى قمة انتشارها فى منتصف شهر ديسمبر .
- اختفت الديناصورات من على وجه الأرض فى 26 ديسمبر .
- ظهرت القردة العليا الشبيهة بالإنسان فى ليلة 31 ديسمبر .
- بدأت أحدث المثالج القارية continental glaciers فى التراجع والتقلص من منطقة البحيرات العظمى فى كندا وشمال أوروبا قبل حوالى دقيقة واحدة و 15 ثانية قبل منتصف ليلة 31 ديسمبر .
- حكمت روما العالم الغربى لمدة 5 ثوان من الساعة 11:59:45 إلى 11:59:50 قبل منتصف ليلة 31 ديسمبر .
- اكتشف كولومبس أمريكا قبل ثلاث ثوان من منتصف ليلة 31 ديسمبر .
- ظهر علم الجيولوجيا على يد جيمس هاتون قبل حوالى ثانية واحدة من نهاية العام .

ا – العمر النسبى

تختلف الطرق التى يقيس بها الجيولوجيون الزمن عن كل طرق قياس الزمن التى عرفها الإنسان على امتداد تاريخه . فالأحداث التاريخية دونتها البشرية وتناقلتها من جيل إلى جيل . ونحن معتادون على أنواع معينة من مقاييس الزمن التاريخى . ونحن نتذكر من حين لآخر تواريخ محددة ذات أهمية خاصة فى حياتنا . ويمكن ترتيب هذه الأحداث على مقياس الزمن ترتيبا متسلسلا من الأقدم إلى الأحدث ، كما يمكن تحديد أعمارها المطلقة مقدرة بالسنين .

ويشمل الزمن الجيولوجى الأحداث التى وقعت فى فترة ماقبل التاريخ بداية من نشأة الأرض ، مرورا بكل الأحداث التى شكلت الأرض حتى اليوم ، مرتبة ترتيبا متسلسلا حسب تاريخ وقوعها . وتقدر الأزمنة بملايين السنين من الآن، ويعبر عنها اختصارا بالرمز Ma . وقد سجل هذا الزمن الجيولوجى فى صخور القشرة الأرضية ، حيث يشبه السجل الصخرى صفحات وفصول الكتاب الذى يحوى أسرار تكوين الأرض فى الماضى .

وفى الحقيقة فإن مقياس الزمن الجيولوجى يشمل مقياسين هما: المقياس النسبى والذى يعبر عن ترتيب الأحداث الجيولوجية كما حددت من خلال وضعها فى السجل الصخرى. وتطلق على الفترات المختلفة من الزمن الجيولوجى مسميات مميزة مثل : الكمبرى والبرمى والطباشيرى. أما المقياس الثانى فهو المقياس المطلق والذى يقدر الأعمار بعدد السنين مقدرة بملايين السنين من الآن (Ma). وتبنى هذه الأعمال على التحلل الإشعاعى الطبيعى لعناصر كيميائية مختلفة ، توجد بكميات قليلة فى معادن معينة فى بعض الصخور. ويمثل الإلمام بقواعد تقدير العمر النسبى والمطلق حجر الزاوية فى فهم تاريخ الأرض .

والسؤال الذى يطرح نفسه : كيف أمكن لعلماء الأرض أن يقرأوا ويفكوا شفرة التاريخ المسجل على هذه الصخور؟، وكيف رتبوا الأحداث الجيولوجية فى إطار زمنى متسلسل؟. وسنحاول فى هذا الفصل أن نختبر الطرق الرئيسية التى اتبعها علماء الأرض لتحديد الزمن. كما سنعرف التطور التاريخى لمفاهيم الزمن الجيولوجى ومولد وتطور العمود الجيولوجى. ونبدأ بمناقشة وسائل تقدير العمر النسبى فى الجيولوجيا :

أ- السجل الطبقى (الاستراتجرافى)

من بين أنواع الصخور الثلاثة (النارية والرسوبية والمتحولة)، والتى تكوّن القشرة الأرضية، فإن الصخور الرسوبية تمدنا بسجل أكثر اكتمالا لتاريخ الأرض. وعلى الرغم من أن الصخور النارية تمثل أكثر من 90 ٪ من حجم القشرة الأرضية، فإن الصخور الرسوبية تمثل أكثر من 75 ٪ من الصخور المكشوفة على سطح الأرض أو توجد فى الكيلومترات القليلة القريبة من السطح . وتمثل الطباقية stratificationأو bedding التى توجد فى الصخور الرسوبية أهمية خاصة فى بناء تاريخ الأرض ؛ حيث تسمح الطباقية بوضع ترتيب وتنظيم وتحديد **للتتابعات الطبقية stratigraphic sequences.**

ويعرف **علم الطبقات (الاستراتجرافيا) stratigraphy** بأنه العلم الذى يدرس الصخور الطباقية أو الطبقات ومضاهاتها. وهو يدرس العلاقات المكانية والزمنية بين أجسام الصخور وديناميكية ترسيبها ، والتى يمكن ملاحظتها وتفسيرها. وتنتج الطباقية من ترسيب وتجمع الحبيبات الصلبة ، والتى تستقر على القاع من الماء أو الهواء تحت تأثير الجاذبية الأرضية فى هيئة طبقات beds متتالية متعاقبة .

وتحدث عملية الترسيب بشكل دورى تعكس فترات ترسيب يعقبها فترات سكون أو توقف للترسيب . وهذا النشاط الدورى فى الترسيب هو المسئول أساسا عن الأنسجة المختلفة التى تلاحظ فى الطبقات المتتالية، وأيضا فى أسطح الطباقية bedding planes التى تفصل بينها. وتحدث عملية الترسيب فى أحواض ترسيب مختلفة الأحجام . وتتصلد الرواسب وتتصخر نتيجة للدفن تحت طبقات لاحقة لها ، مما يزيد من وضوح أسطح الطباقية والحدود بين الطبقات .

1- القواعد الأساسية لتحديد العمر النسبى

هناك عدة قواعد أساسية تستخدم لتفسير الأحداث الجيولوجية فى السجل الصخرى، يمكن توضيحها فيما يلى:

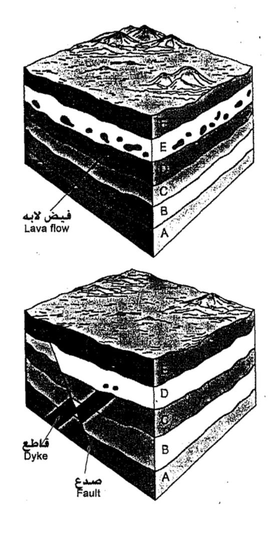
أ- قاعدة تعاقب الطبقات Principle of stratigraphic superposition

هى إحدى القواعد الأساسية لعلم الطبقات ، وتنص على أن كل طبقة فى التتابع الرسوبى الذى لم يتعرض لأية قوى تكتونية تكون أحدث عمرا مما تحتها وأقدم فى العمر من الطبقة التى تعلوها (شكل 1.9أ) . ويعتبر تطبيق قاعدة التعاقب الطبقى هو الخطوة الأولى فى تقدير العمر النسبى فى الصخور الطباقية .

وحيث إن قاعدة التعاقب الطبقى تحتم عدم تعرض التتابع الطبقى لتأثيرات تكتونية ، فإنه من المهم أن نعرض لقاعدة أخرى من قواعد علم الطبقات تعالج التاريخ النسبى فى التتابعات المتأثرة بالعمليات التكتونية ، وهو ما يعرف بقاعدة الأفقية الأصلية .

ب- قاعدة الأفقية الأصلية Principle of original horizontality

وهى تنص على أنه ليس فقط عملية الترسيب التى تحدث من أسفل لأعلى (وبالتالى تتجمع الرواسب فى طبقات متلاحقة)، ولكن أيضا أسطح الترسيب، والتى تكون مستوية أساسا ولا تميل إلا بدرجات قليلة عن الأفقى. ولهذا فإن الطبقات الرسوبية تكون أساسا أفقية ، لأن الأسطح التى تتجمع فوقها الرواسب (والتى تفصل بين الرواسب من جهة والماء أو الهواء من جهة أخرى) تكون أفقية أساسا ، وتتجمع فوقها الحبيبات تحت تأثير الجاذبية. وعلى الرغم من أن التطابق المتقاطع cross-bedding والذى سبق مناقشته أثناء



شكل (1.9): التقدير النسبى لأعمار الصخور

أ) طبقات رسوبية تعلوها لابة يطبق عليها قاعدة التعاقب الطبقى stratigraphic superposion ، حيث تكون الوحدة (A) أقدم الطبقات يليها الوحدة (B) فالوحدة (C) فالوحدة (D) فالوحدة (E) فالوحدة (F). لاحظ أن وجود بعض المكتنفات من الوحدة (D) فى الوحدة (E) يدل على أن الوحدة (E) أحدث عمرا من الوحدة (D) .

ب) بتطبيق قاعدة القطع المستعرض cross cutting relationship يتضح أن القاطع أحدث عمرا من الوحدة (C) ، بينما يكون أقدم من الوحدة (D) . وتشير إزالة التجوية للجزء العلوى من القاطع إلى أن الوحدة (D) أحدث عمرا من القاطع ، كما أن الصدع يكون أحدث عمرا من الوحدة (D) وأقدم عمرا من الوحدة (E) .

لاحظ أن هذا الشكل يحتوى على سطحى عدم توافق unconformity أحدهما بين الوحدتين (C) و (D) والآخر بين (D) و (E) .

دراسة الصخور الرسوبية ، يكون مائلا ، إلا أن التوجه الكلى لوحدات التطبق المتقاطع تكون أفقية. وعندما نشاهد تتابعات طبقية تميل على الأفقى بشكل واضح ، فإن هذا يعزى إلى أن أحداث مابعد الترسيب أدت إلى ميلها . فإذا مال تتابع طبقى أكثر من الوضع الرأسى سمى التتابع الطبقى معكوس الوضع reversed ويكون وضع الطبقات مقلوبا overturned . وتعمل القوى التكتونية على إمالة وطى وتكسير الطبقات الصخرية الموجودة فى القشرة الأرضية.

ويحتم تحديد ترتيب الطبقات فى التتابع الطبقى الرسوبى أن نحدد بشكل دقيق سمات السطح العلوى والسفلى للطبقات . وتكون هذه السمات عبارة عن تراكيب رسوبية أولية تتكون عند ترسيب الرواسب . وتوجد التراكيب الرسوبية على السطح الخارجى للطبقات ، كما قد توجد داخل الطبقات أيضا (شكل 13.10).

ج- قاعدة الاستمرارية الجانبية الأصلية Principle of original lateral continuity

تترسب الصخور الرسوبية فى أجسام ثلاثية الأبعاد، وتمتد أفقيا فى كل الاتجاهات حتى تتلاشى عند حافة حوض الترسيب الذى تترسب فيه ، أو تتغير خواصها إلى نوع آخر من الرواسب . ويتحدد امتداد الطبقات أفقيا من خلال عملية المضاهاة correlation. فعندما تضاهى المنكشفات المنفصلة للوحدة الصخرية نفسها

بشكل صحيح، فإنها تدل على أن هذه المنكشفات عبارة عن أجزاء مما كان وحدة واحدة متصلة فى الأساس.

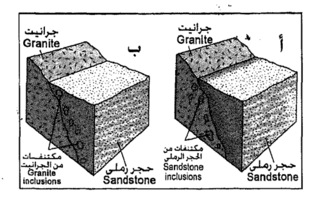
وتحمل الطبقات الرقيقة الواسعة الانتشار التى لها صفات خاصة مميزة أهمية زمنية ؛ أى تعبر عن لحظة زمنية محددة يمكن استخدامها كخطوط تعبر عن التساوى الزمنى عند إجراء المضاهاة . وتعتبر هذه الوحدات الفيزيائية المتماثلة متزامنة جيولوجيًا على امتداد منطقة تواجدها ، مثل طبقات الرماد البركانى والتى تأخذ شكل الفريشة (الملاءة) blanket تترسب من التدفقات البركانية. وتقدم هذه الطبقات الدالة key or marker beds وسيلة مضمونة على نطاق شبه إقليمى لإجراء المضاهاة .

د- قاعدة علاقات القطع المستعرض Principle of cross-cutting relationships

من المبادئ المهمة المستخدمة فى تحديد العمر النسبى قاعدة علاقات القطع المستعرض . ويدل مفهوم هذه القاعدة على أن أى شىء يقطع طبقة من الصخور الرسوبية أو أى نوع من الصخور يكون أحدث عمرا من الطبقة الرسوبية أو من تلك الصخور ، بمعنى أن القاطع يكون أحدث عمرا من المقطوع ، فأجسام الصخور النارية المتداخلة (مثل : القواطع dikes) والصدوع تقطع الصخور والتراكيب السابقة عليها فى التكوين، وبالتالى فهى أحدث عمرا منها (شكل 1.9 ب).

هـ- قاعدة المكتنفات (المتداخلات) Principle of inclusions

وهى تنص على أن الفتات والحبيبات التى توجد فى صخر تكون أقدم عمرا من الصخر نفسه. فإذا احتوت طبقة ما على فتات من طبقة أو جسم نارى مجاور كانت تلك الطبقة الأخيرة أو الجسم النارى أقدم عمرا والعكس صحيح (شكل 2.9).



شكل (2.9): قاعدة المكتنفات Principle of inclusions

أ) الباثوليث أحدث عمرا من الحجر الرملى ، نظرا لأن الحجر الرملى قد تأثر بالحرارة عند سطح التلامس مع الجرانيت ، كما أن الجرانيت يحتوى على مكتنفات inclusions من الحجر الرملى .

ب) تدل مكتنفات الجرانيت فى الحجر الرملى أن الباثوليث كان مصدر نشأة الحجر الرملى ، ولذلك فيعتبر الجرانيت أقدم عمرا من الحجر الرملى .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd eedition. West Publishing Company, Minneapolis).

و- قاعدة التتابع الحفرى Principle of fossil succession

لعبت قاعدة التتابع الحفرى دورا رئيسيا فى تطور علم الجيولوجيا التاريخية، وهى تنص على أن كل طبقة أو مجموعة من الطبقات فى التتابعات الرسوبية تحتوى على حفريات مميزة تختلف عما تحتها ومافوقها . وتمثل الحفريات **fossils** بقايا كائنات حية قديمة أو آثارها ، وهى تساعد كثيرا فى تحديد العمر النسبى للصخور الرسوبية. وقد دعمت قاعدة التتابع الحفرى قاعدة التعاقب الطبقى كثيرا، لأن الحفريات ليست كالحبيبات غير العضوية تتواجد عشوائيا، وإنما تتواجد بنظام محدد يمكن تتبعه. فأنواع الصخور يمكن أن تتكرر كثيرا فى التتابعات الطبقية الرأسية بتكرار ظروف الترسيب، بينما تتغير المجموعات الحفرية باطراد رأسيا ولا تتكرر أبدا بسبب نظام التطور الذى لا يعيد الكائن المنقرض مرة ثانية. ويسمى هذا الترتيب الطبقى للحفريات

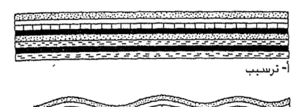
بالتتابع الحفرى (تتابع المجموعة الحيوانية faunal succession).

س- بصمات المغناطيسية الأرضية القديمة Paleomagnetic signatures

من الإضافات المهمة التى حدثت فى القرن العشرين إلى علم الطبقات اكتشاف بصمات المغناطيسية الأرضية القديمة paleomagnetism فى الصخور. حيث يظهر فى صخور التتابعات الطبقية تتابع من أحداث القطبية المغناطيسية (أى اتجاه المجال المغناطيسى للأرض فى وقت ما)، من القطبية العادية normal polarity أى المماثلة لاتجاه المجال المغناطيسى الحالى للأرض والقطبية المعكوسة reversed polarity أى يكون اتجاه المجال المغناطيسى عكس اتجاه المجال الحالى، حيث يكون قطب الأرض الشمالى متجهًا نحو الجنوب الحالى. ولقد تعرض المجال المغناطيسى للأرض للانقلاب كثيرا طوال تاريخ الأرض الطويل، كما تغير موضع الأقطاب المغناطيسية كثيرا جدا أيضا بسبب حركة الكتل المتقاربة بالنسبة للأقطاب. وهذا يقدم وسائل أخرى لتقسيم التتابعات الطبقية، كما يمكن به إجراء المضاهاة بين التتابعات الطبقية المتباعدة أيضا.

2- عدم التوافق

من الظواهر الطبقية المهمة التى تفيد كثيرا فى تحديد العمر النسبى والتاريخ الجيولوجى ما يعرف بعلاقة عدم التوافق **unconformity**. ويعرف عدم التوافق بأنه سطح تعرية أو عدم ترسيب مدفون، وبالتالى فهو يعبر عن جزء مفقود من السجل الجيولوجى نتيجة التعرية وعدم الترسيب (شكل 3.9). فعدم التوافق هو سطح بين طبقتين يفصل بينهما فاصل زمنى. ويمكن تعرف أربعة أنواع من عدم التوافق (شكل 4.9)، هى:



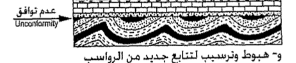












شكل (3.9): المراحل المتتابعة لتكوّن عدم التوافق.

(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

1- عدم التوافق التباينى **nonconformity** وهو سطح طبقى يفصل بين صخور متبلورة (نارية أو متحولة) أقدم عمرا وأخرى رسوبية أحدث عمراً.

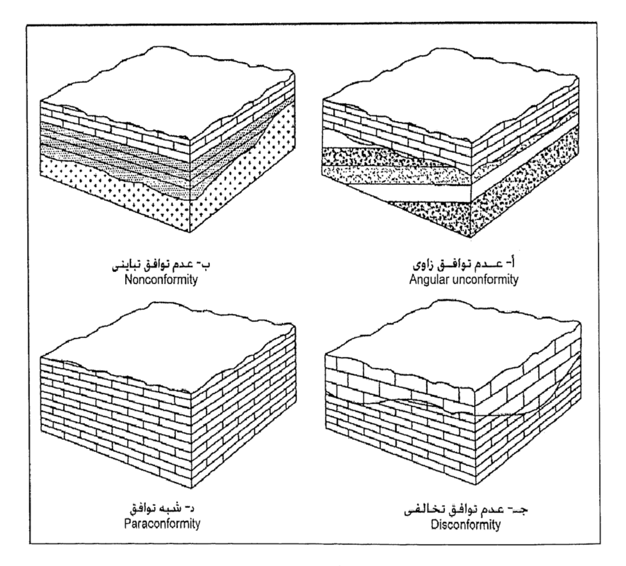
2- عدم التوافق الزاوى **angular unconformity** وهو سطح تعرية يفصل بين مجموعتين من الطبقات مختلفتين فى زاوية الميل.

3- عدم التوافق التخالفى **disconformity** وهو نوع يصعب تعرفه، حيث يوجد سطح تعرية متعرج الشكل بين طبقات متوازية، وفيه يقطع سطح عدم التوافق أسطح الطباقية، ويكون الشاهد عليه وجود دليل على حدوث عملية تجوية

مثل وجود فتات من الصخور التى تليه فى الصخور التى تعلوه، مثل صخر الكونجلومرات.

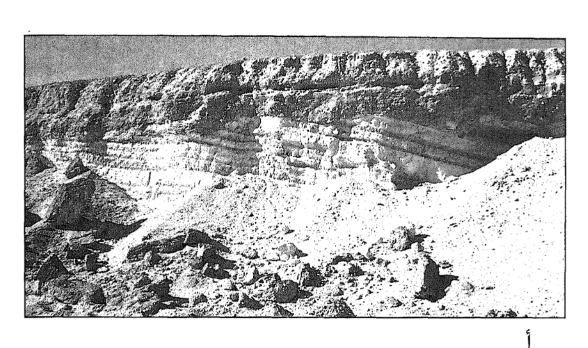
4- شبه التوافق paraconformity وهو أصعب أنواع عدم التوافق، حيث يعتمد تعرفه على اختلاف عمر الطبقات التى تليه عن الطبقات التى تعلوه، ويكون الشاهد عليه اختلاف المحتوى الحفرى لكلا التتابعين أسفله وأعلاه. ويوضح شكل (5.9أ) عدم التوافق الزاوى فى المنطقة شمال حمام فرعون - سيناء - مصر، بينما يوضح شكل (5.9ب) عدم توافق تباينى فى الواحات البحرية بمصر.

ويعبّر عن الفترة الزمنية المقابلة لعدم التوافق بثغرة ترسب (الثلمة) hiatus، وهى تساوى الفرق فى الزمن بين الصخور التى تقع فوق سطح عدم التوافق وتلك التى تقع تحته (شكل 6.9). وتجدر الإشارة إلى أن سطح عدم التوافق يمثل غيابا لفترة زمنية طويلة جيولوجيا. أما إذا كانت الفترة المفقودة من التتابع الطبقى قصيرة فإننا نشير إليها بالفصلة diastem. وفى العادة فإن عدم التوافق يشير إلى فقد لفترات زمنية تتراوح بين ملايين أو عشرات الملايين من السنين، بينما تعبر الفصلة عن فقد لفترات زمنية قصيرة نسبيا تصل إلى أسابيع أو شهور أو حتى قرون.

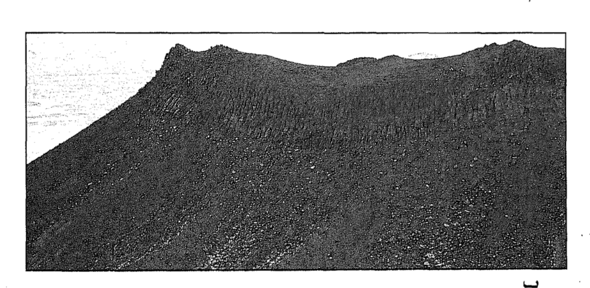


شكل (4.9): أنواع عدم التوافق.

وتسمح القواعد الأساسية السابق ذكرهـا بتحديـد العمر النسبى بالنظر إلى مجموعة رأسية مـن الطبقـات ، أو إلى أى تتابع طبقـى (اسـتراتجرافى stratigraphic sequence- على أنـه سـجل مرتـب زمنيـا للتـاريخ الجيولوجى لمنطقة ما . ويـسمى الخـط الزمنـى المقابـل والموضوع على أساس هذا التتابع بـالزمن الجيولـوجى geologic time ، وهو الممثل زمنيا لهـذا التتـابع ، أى كسجل جزئى كامل للوقت الذى انقضى منـذ ترسـبت



أ



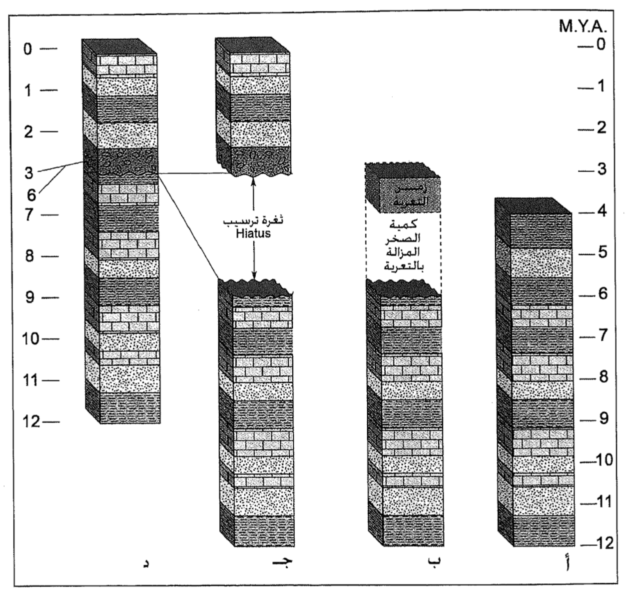
ب

شكل (**5.9**):

أ) عدم التوافق الزاوى angular unconformity وهو سطح تعرية يفصل بين مجموعتين من الطبقات مختلفتين فى زاوية الميل . منطقـة شمال حمام فرعون ، سيناء – مصر .

ب) عدم توافق تباينى nonconformity بين صخور رسوبية أقدم عمرا (العصر الطباشيرى Cretaceous) وصخور بركانيـة أحـدث عمرا (العصر الثالث Tertiary)، الواحات البحرية – مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية).

أقدم الطبقات فى أسفل التتابع إلى أحدث الطبقات فى أعلى التتابع (يستخدم مصطلح الزمن الجيولوجى أيضا للإشارة إلى الفترة الزمنية الممتدة، منذ انتهاء مرحلة تكوين الأرض ككوكب منفصل حتى بداية التاريخ المكتوب). وتختلف التتابعات الطبقية عن التتابعات الرسوبية التى تم مناقشتها فى الفصل السابع. فالتتابعات الرسوبية هى تغيرات رأسية فى التركيب الصخرى للرواسب المتكونة فى بيئة ترسيب واحدة. أما



شكل (6.9): شكل مبسط لتوضيح عدم التوافق **unconformity** وثغرة الترسيب **hiatus**.

أ. بدأ الترسيب قبل **12** مليون سنة مضت (**M.Y.A.**)، واستمر دون توقف تقريبا حتى قبل **4** ملايين سنة مضت.

ب. بدأت فترة تعرية استمرت لمليون سنة تم خلالها تعرية طبقات تمثل **2** مليون سنة من التتابع الذى ترسب خلال الفترة الأولى.

جـ. وجدت ثغرة ترسيب **hiatus** تساوى ثلاثة ملايين من السنين بين مجموعتى الطبقات الأقدم، وتلك التى ترسبت خلال فترة ترسيب جديدة خلال الثلاثة ملايين سنة الأخيرة.

د. يمثل الشكل التتابع الطبقى الحقيقى، وفيه سنجد سطح عدم توافق يفصل بين مجموعتين من الطبقات، ويمثل فترة انقطاع فى سجل الزمن الجيولوجى.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company Minneapolis).

التتابع الطبقى فهو أشمل فى التعريف ويضم طبقات واسعة التغير لكل منها أصل مختلف. وبينما يتم التأكيد فى التتابعات الرسوبية على طبيعة الأنواع المتتابعة من الرواسب فإن التأكيد فى التتابعات الطبقية (الاستراتجرافية) يكون على التتابع الزمنى للطبقات المكوّنة للتتابع وظروف الترسيب.

II. مضاهاة الوحدات الصخرية

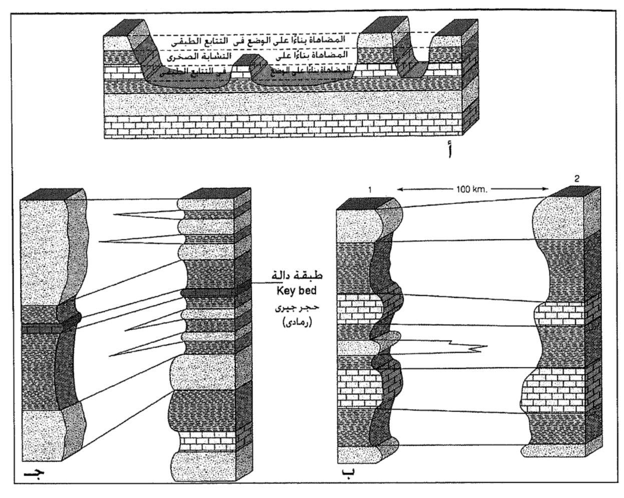
تمكن المساح الإنجليزى وليام سميث William Smith عام 1793 م من تعرف أن الحفريات يمكن استخدامها لتحديد الأعمار النسبية للصخور الرسوبية. وقد لاحظ من خلال دراسة العديد من الحفريات أن الطبقات المختلفة كانت تحتوى على أنواع مختلفة من الحفريات ، وأنه يمكن تمييز طبقة عن الأخرى باستخدام الحفريات المميزة لكل طبقة. ويسمى هذا الترتيب الاستراتجرافى للحفريات بالتتابع الحفرى faunal succession.

وقد فتح هذا الاكتشاف الباب لعمل مضاهاة للطبقات الرسوبية على مساحات أوسع. وتعنى المضاهاة **correlation** تحديد التماثل بين أجزاء وحدة استراتجرافية مفصولة جغرافيًا. وتشمل الوحدات الاستراتجرافية طبقة أو مجموعة من الطبقات تتميز ببعض الخصائص الفيزيائية أو الكيميائية أو الحيوية. ولقد قام سميث فى بادئ الأمر بمضاهاة الطبقات على أساس التشابه فى الخواص الفيزيائية (التركيب الصخرى والمعدنى) ، بالإضافة إلى محتواها الحفرى وذلك على مسافات تبلغ عدة كيلومترات، ثم بعد ذلك على مسافة عشرات الكيلومترات. ولقد أصبح من الممكن استخدام الحفريات وحدها فى عمل مضاهاة بين تتابعات تفصل بينها مئات أو آلاف الكيلومترات.

ويشمل ما يعرف بقانون المضاهاة القواعد التى وضعها سميث للمضاهاة بين التتابعات الطبقية . وينص هذا القانون على أن : "الطبقات التى لها نفس التركيب الصخرى والمعدنى والتى تحتوى على حفريات متشابهة تنتمى إلى نفس العمر الجيولوجى".

ويتضمن عمل المضاهاة هدفين أساسين: الأول تحديد الأعمار النسبية للوحدات المنكشفة بالنسبة لبعضها البعض فى المنطقة التى يتم دراستها، والثانى عمل مقارنة بين أعمار الوحدات بالنسبة إلى مقياس الزمن الجيولوجى. وتتم مضاهاة الوحدات الصخرية بعدة طرق (شكل 7.9)، تشمل أنواع الصخور المتشابهة والوضع فى التتابع الطبقى والمحتوى الحفرى.

وتستخدم مميزات الصخور مثل اللون وحجم الحبيبات والتراكيب الرسوبية التى تسمح بتميز كل وحدة صخرية عن الأخرى عند عمل المضاهاة بين الوحدات الصخرية، خاصة إذا كانت المنكشفات كافية. ومن الأهمية بمكان معرفة أن عملية مضاهاة الصخور يقابلها الكثير من الصعوبات عند تطبيقها، لذلك يجب مراعاة القواعد التى وضعها الجيولوجيون بعد سميث للتوصل لعمل مضاهاة دقيقة. فيجب عند استخدام قاعدة الاستمرارية الجانبية lateral continuity principle مراعاة أن تلك الطريقة يمكن استخدامها عند المضاهاة فى حوض ترسيبى واحد ؛ لأنه من المعروف أن الطبقات الرسوبية تستدق وتنتهى عند حواف أحواض الترسيب، كما أنها قد تتدرج إلى أنواع أخرى من الصخور نتيجة تغيرات السحنات (شكل 23.7) . كما يجب مراعاة أن الاعتماد على التشابه الصخرى فقط بين الطبقات لا يكفى كما ذكرنا إلا فى حالات خاصة جدا. كذلك يجب مراعاة الوضع التركيبى للطبقات ؛ حيث يمكن استخدام وضع الطبقات بالنسبة إلى تركيب تكتونى معين (مثل عدم



شكل (7.9): مضاهاة **correlation** الوحدات الصخرية

أ) يسهل تتبع الوحدات الصخرية أفقيا فى المناطق التى تكون فيها التتابعات الطبقية مكشوفة .

ب) يمكن مضاهاة الوحدات الصخرية للتشابه فى النوعية الصخرية والتشابه فى الوضع فى التتابع الطبقى ، ويتدرج الحجر الرملى جانبيا فى القطاع **1** إلى طفل فى قطاع **2**.

ج) يمكن المضاهاة اعتمادا على الطبقة الدالة **key bed** ، وهى فى هذه الحالة حجر جيرى ذو لون رمادى مميز .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

التوافق مثلا) مما يساعد على مضاهاة الطبقات. ولكن قد تؤدى بعض الأوضاع التكتونية إلى تغير وضع الطبقات مما لا يسمح بتطبيق قاعدة تعاقب الطبقات. فعند ملاحظة ميل الطبقات والتوائها فى شكل (12.10) مثلما يحدث أثناء التصادم القارى ، فإن التشوه قد يكون كبيرا لدرجة أن الطبقات الأقدم قد تأتى فوق الطبقات الأحدث . وبالتالى فإن الاستنتاجات المبنية على الطبقات المقلوبة قد تؤدى قطعا إلى نتائج غير صحيحة عند تقدير الزمن النسبى للطبقات . ويمكن استخدام بعض الأدلة مثل علامات النيم والتطبق المتدرج والتطبق المتقاطع لتحديد ما إذا كانت الطبقات فى الوضع الصحيح أم أنها قلبت شكل (13.10).

كما يمكن عمل المضاهاة بين الوحدات الصخرية عن طريق الوضع فى التتابع الطبقى والطبقة الدالة key bed (شكل 7.9ج) مثل طبقات الفحم والرماد البركانى . وتكون مثل هذه الطبقات مهمة عند عمل

مضاهاة بين تتابعات صخرية ؛ خاصة على نطاق إقليمي.

وتستخدم الحفريات للدلالة على زمن الوحدات الصخرية ، حيث تمثل تلك الحفريات بقايا لكائنات حية عاشت لفترة زمنية خلال الزمن الجيولوجي الماضي.

وتسمى الحفرية التى تستخدم فى تحديد عمر الطبقات التى تحتويها ، بالحفرية المرشدة (الدالة) **index fossil** . ولكى تكون الحفرية مرشدة ، فإنها يجب أن تكون شائعة فى الطبقات ولها توزيع جغرافى واسع ، ومدى زمنى محدود . ومن أحسن الأمثلة على الحفرية المرشدة الكائنات الحية الطافية والتى تتميز بتطور سريع وانتشار جغرافى واسع (شكل 8.9). وإذا تم تعرف حفرية دالة فى منكشف ما ، فإن عملية المضاهاة تصبح سهلة وموثوق فيها. ويمكن بذلك عمل مضاهاة باستخدام التتابع الحفرى (شكل 9.9) fossil succession.

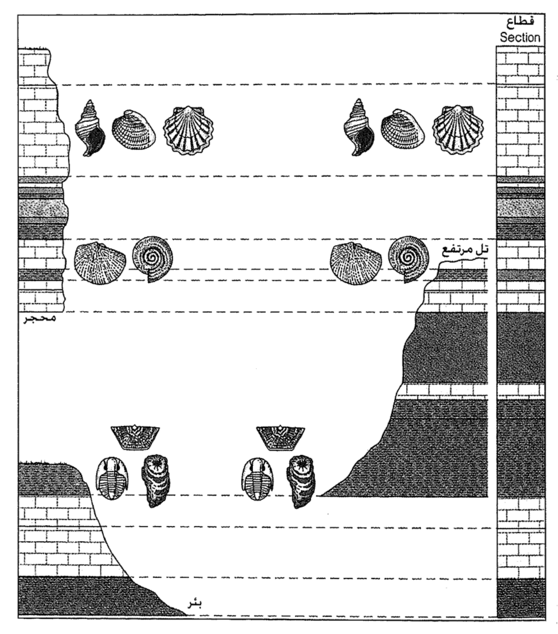
الحياة الحديثة Cenozoic	الثالث Tertiary		
الحياة المتوسطة Mesozoic	الطباشيرى Cretaceous	إنوسيرموس *Inoceramus*	لنجيولا *Lingula*
	الجوراسى Jurassic		
	الترياسى Triassic		
الحياة القديمة Paleozoic	البرمى Permian		
	البنسلفانى Pennsylvanian		
	المسيسبى Mississippian		
	الديفونى Devonian		
	السيلورى Silurian		
	الأوردوفيشى Ordovician	أيزوتيلوس *Isotelus*	
	الكمبرى Cambrian		

شكل (**8.9**): المدى الزمني لثلاث حفريات ، يوضح أن جنس لنجيولا ***Lingula*** من المسرجيات له قيمة محدودة فى المضاهاة بسبب طول مداه الزمني الكبير ، بينما يعتبر جنس أيزوتيلوس ***Isotelus*** من ثلاثية الفصوص وجنس إنوسيرموس ***Inocermus*** من المحاريات من الحفريات المرشدة لأن لها انتشارا جغرافيا واسعا ويسهل تعرفها ولها مدى زمني قصير .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

وبالإضافة إلى المضاهاة بين الوحدات الصخرية المنكشفة فوق سطح الأرض، فإنه يمكن المضاهاة بين الوحدات الصخرية تحت السطحية عند البحث عن المعادن والفحم والبترول باستخدام تسجيلات الآبار well logs التى توضح الخصائص الفيزيائية المقاسة للقطاع الصخرى أثناء الحفر، والعينات الأسطوانية cores التى يتم الحصول عليها من الآبار، وأيضا شظايا الحفر cuttings التى تخرج إلى السطح أثناء حفر الآبار.

وقد استطاع الجيولوجيون خلال القرنين الماضيين باستخدام التتابعات الحفرية والتتابعات الاستراتجرافية أن يضاهوا المتكونات فى جميع أنحاء العالم ليخرجوا



شكل (9.9): المضاهاة باستخدام التتابع الحفرى Fossil succession . تضاهى مجموعات الطبقات التى تنتمى إلى العمر الجيولوجى نفسه، والتى توجد منكشفة فى محجر أو على تل مرتفع أو آبار تحت سطحية بناء على احتوائها على المجموعة نفسها من الحفريات . وبعد أن يتم إجراء المضاهاة يمكن عمل قطاع section كامل للتتابع فى المنطقة يوضح الأعمار النسبية لكل الطبقات، والذى يظهر على الجانب الأيمن للشكل .
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

بنتيجة هذا الجهد، وهو مقياس الزمن الجيولوجى لكل الأرض.

III. العمر المطلق

ناقشنا حتى الآن القواعد التى يمكن على أساسها ترتيب التتابعات الطبقية كما تستنتج من قوانين علم الطبقات المختلفة مثل : التعاقب الطبقى وعلاقات القطع المستعرض والتتابع الحفرى وغيرها. إلا أن مقياس الزمن الجيولوجى لا يشتمل فقط على مقياس نسبى ولكنه يشمل أيضا مقياسًا مطلقًا مقدرًا بالسنين من الآن، ومتراكبًا مع القياس النسبى. وعلى الرغم من أنه مقدر بالسنين (عادة بالملايين Ma) من الآن ، إلا أنه ليس تقديرا دقيقا بالمعنى الحقيقى، نظرا لوجود نسبة بسيطة من الخطأ فى الحسابات. فإن تقديرا مطلقا مثل 4600 مليون سنة من الآن والممثل لعمر الأرض ، أو 245 مليون سنة من الآن والممثل للحد الفاصل بين حقبتى الحياة القديمة والوسطى يعطينا تقديرا لدرجة القدم، كما يحدد المدى الزمنى لتقسيمات العمود الجيولوجى النسبية .

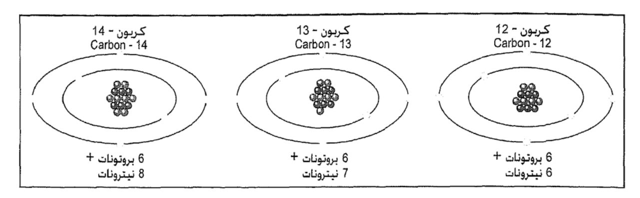
ويلاحظ أن مقياس الزمن النسبى قد بنى تدريجيا حتى أخذ شكله الحالى بنهاية القرن التاسع عشر. أما مقياس العمر المطلق ، فقد تطور من خلال علم الزمن الجيولوجى Geochronology والذى أصبح حقيقة واقعة فى العقود الأولى من القرن العشرين بعد اكتشاف ظاهرة نشاط **الإشعاع الذرى radioactivity** وتطبيقاتها على المعادن . وقد استمر تطبيق كلا المقياسين حتى اليوم . ويعتبر المقياسان النسبى والمطلق من الإنجازات المهمة فى تاريخ العلم.

أ- أسس التقدير الإشعاعى

يبنى التقدير الإشعاعى على ظاهرة أن هناك كثيرًا من الذرات غير الثابتة، وبالتالى التغير باستمرار إلى حالة أكثر ثباتا وأقل طاقة. ويترتب على عملية التغير هذه اضمحلال إشعاعى radioactive decay، يؤدى بدوره إلى **انبعاثات إشعاعية radioactive emissions**. وتختلف الذرات عن بعضها بعضا ، والتى تدعى نويات nuclides فى عدد البروتونات (جسيمات مشحونة بشحنة موجبة) والنيوترونات (جسيمات متعادلة الشحنة) الموجودة فى نواة الذرة.

ويعرف كل عنصر كيميائى فى الجدول الدورى بعدد البروتونات فى النواة ، وهو عدد ثابت ومميز لكل عنصر ، والتى تمثل العدد الذرى atomic number. فعلى سبيل المثال، عنصر الهيليوم (He) وهو العنصر الثانى فى الجدول الدورى يحتوى على بروتونين فى نواته، بينما يحتوى عنصر اليورانيوم، والذى يحمل رقم 92 فى الجدول الدورى على 92 بروتونا فى نواته. أما رقم الكتلة mass number فهو عدد البروتونات مضافا إليه عدد النيوترونات الموجودة فى نواة الذرة. أما المدارات حول النواة فتملأ بالإلكترونات (جسيمات مشحونة بشحنة سالبة)، والتى يساوى عددها عدد البروتونات الموجودة فى نواة الذرة. وبالتالى فإن لكل نوية nuclide عددا ذريا مميزا.

وكل عنصر كيميائى، والذى هو عبارة عن نوية لها عدد ذرى ثابت ، يمكن أن يكون له أشكال مختلفة تدعى **نظائر isotopes** ، والتى تتمايز بناءً على عدد النيوترونات الموجودة داخل نوياتها. وبالتالى فإن النظائر المختلفة للعنصر نفسه يكون لكل نظير منها رقم كتلة مختلف(شكل 10.9). فاليورانيوم -235 ونظيره اليورانيوم - 238 يحتويان على عدد البروتونات نفسه ، بينما يختلفان فى عدد النيوترونات (وبالتالى لهما رقما كتلة مختلفان). ويلعب هذان النظيران دورا مهمًا فى تقدير العمر المطلق لبعض أنواع الصخور النارية.



شكل (10.9): نظائر الكربون الثلاثة . لاحظ أن النظائر الثلاثة تحتوى نواتها على ستة بروتونات ، كما توجد ستة إلكترونات فى مستويات الطاقة بها . وتختلف عن بعضها بعضا فى عدد النيترونات التى يحتويها كل نظير .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ومعظم نظائر العناصر الكيميائية الموجودة فى الأرض هى عناصر مستقرة وغير معرضة للتحول. ولكن هناك عددًا قليلاً من النظائر مثل ^{14}C تكون مشعة بسبب عدم استقرار النواة، حيث إن هناك حدودًا يمكن أن تتغير فيها أعداد الكتلة للنظائر لأى عنصر. وتتغير نواة النظير المشع ذاتيا إما إلى نواة نظير أكثر استقرارا للعنصر الكيميائى نفسه وإما إلى نظير لعنصر كيميائى مختلف . وتختلف سرعة التحول لكل نظير. وعلى الرغم من أن هذه العملية هى واحدة من التحولات - من نواة غير ثابتة إلى نواة أخرى أكثر ثباتا- إلا أنه أصبح من الشائع تسمية هذه العملية بالاضمحلال الإشعاعى **radioactive decay** كما سبق أن ذكرنا. ويسمى العنصر الذى تضمحل نواته إشعاعيا بالأصل (ولود) **parent**، ويسمى الناتج من الاضمحلال الإشعاعى بالوليد **daughter**. ويضمحل ^{14}C إلى ^{4}N ويضمحل ^{238}U إلى ^{206}Pb ، ويسمى كل من ^{14}C و ^{238}U أصلا (ولودا) و ^{4}N و ^{206}Pb وليدا.

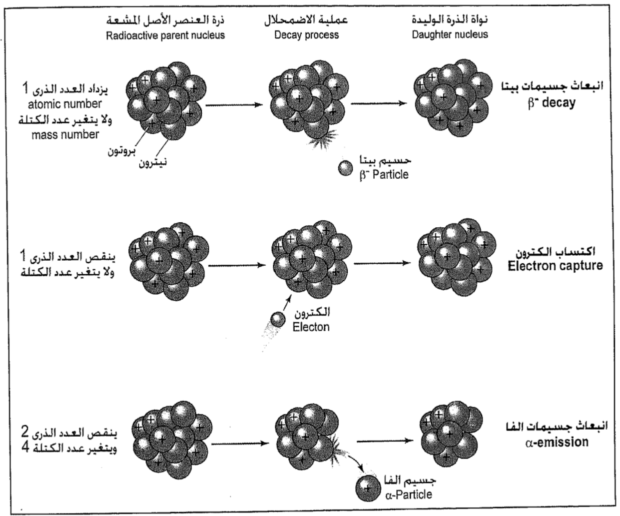
ب- الاضمحلال الإشعاعى

إن عديدًا من النظائر المشعة والتى كانت موجودة يوما ما فى الأرض قد اضمحل ولم يبق لها وجود الآن. ويرجع السبب فى ذلك إلى أن معدلات الاضمحلال الذاتى لهذه العناصر كانت سريعة . ومع ذلك فمازال يوجد حتى الآن القليل من النظائر المشعة والتى تتحول ببطء . ولقد بينت الدراسة المعملية الدقيقة للنظائر المشعة أن معدلات الاضمحلال لا تتأثر بأية تغيرات فى البيئة الطبيعية أو الكيميائية. ولذلك لا يتغير معدل الاضمحلال لنظير ما سواءً كان فى الوشاح أو فى الصهارة أو فى الصخر الرسوبى ، وهذه نقطة مهمة توضح أن معدلات الاضمحلال الإشعاعى لا تتأثر بأية عمليات جيولوجية.

ويترتب على الاضمحلال الإشعاعى : (1) انطلاق جسيمات ألفا (انطلاق بروتونين ونيوترونين من نواة الذرة) ، (2) انطلاق جسيمات بيتا (انطلاق إلكترون بسرعة عالية من النواة) ، (3) كما قد تكتسب النواة إلكترونا من خارجها (شكل 11.9). ويترتب على الاضمحلال الإشعاعى بانطلاق جسيمات ألفا أن تفقد نواة العنصر الولود بروتونين ونيوترونين ، ويتكون نظير وليد جديد يقل عدد الكتلة فيه بمقدار 4، كما يقل العدد الذرى فيه بمقدار 2 عن النظير الولود. بينما فى الاضمحلال الإشعاعى ، فإن انطلاق جسيمات بيتا، يجعل النواة تطلق إلكترونا ويتحول أحد النيوترونات فيها إلى بروتون، وبالتالى تبقى كتلة النواة ثابتة ، بينما

يزيد العـدد الـذرى بمقـدار 1 ويتكـون نظـير جديـد . وفى حالة اكتسـاب إلكـترون، يلـتقط أحـد بروتونـات نواة العنصر إلكترونا من المـدار الخـارجى ويتحـول إلى نيـوترون ، ممـا يترتـب عليـه نقـص العـدد الـذرى بمقدار 1 ، ويتكون نظير جديـد ، بينمـا تبقـى الكتلـة ثابتة.

خطوات تحلل بيتا. وبغض النظـر عـن أى تعقيـدات ، فـإن القـانون الأساسـى فى الاضـمحلال الإشـعاعى ثابت، وهـو "نـسبة الـذرات الأصـل (الولـودة) التـى تضمحل إشـعاعيا أثنـاء كـل وحـدة زمنيـة هـى دائـما النسبة نفسها" . ومن المهم أن نعرف أن معدل التحلـل أو الاضـمحلال الإشـعاعى rate of radioactive



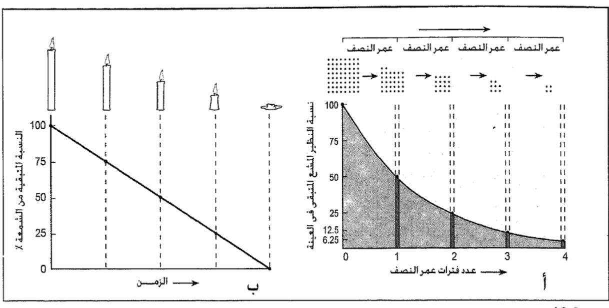
شكل (11.9): طرق الاضمحلال الإشعاعى ، ويلاحظ أن العدد الذرى (عدد البروتونـات) للعنـصر الوليـد daughter يختلـف عـن العـدد الذرى للعنصر الأصل parent فى كل حالة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

معدل الاضمحلال الإشعاعى: تـضمحل العنـاصر المشعة إلى نظائرها غـير المشعة بـانطلاق نـواتج تحلـل محـددة. فمـثلا يتحلـل عنـصر اليورانيـوم - 238 إلى الرصاص-206 من خلال 10 خطوات تحلل ألفـا و7

decay من عنصر ولود لنظيره الوليـد يكـون بمعـدل ثابت لا يتغير، يسمى ثابت التحلل. وكما هـو معـروف فى علم المعادن، فإذا دخلت نوية مشعة فى تركيب معدن عند تبلوره، فإن كمية النظير المشع (النـواة الأصـل أو

الولودة) والتى تتحلل إلى النظير غير المشع (النواة الوليدة) مثل تحول اليورانيوم -238 إلى رصاص - 206، هو معامل فقط فى الفترة الزمنية اللازمة للتحول. إلا أنه لدقة المعلومات، فإنه من المحتم أن (N/4) سيبقى مشعا بعد مرور فترة عمر نصف أخرى، وبعد مرور فترة عمر نصف أخرى سيتبقى ثُمن الكمية الأصلية (N/8)، وهكذا إلى مالا نهاية (شكل 12.9).



شكل (12.9):

أ. منحنى الاضمحلال الإشعاعى، والذى يستخدم فى تحديد عمر صخر بمضاهاة نسبة النظير المشع المتبقى إلى الكمية الأصلية فى العينة. وتمثل الأعمدة الأغمق لونا كمية المادة المشعة المتبقية بعد كل فترة عمر نصف، بينما تمثل الأعمدة المهشرة كمية المادة التى تحولت إلى النظير غير المشع. أما عدد النقاط فى المربعات فوق الشكل فيشير إلى عدد الذرات المشعة المتبقية.

ب. للمقارنة بين منحنى الاضمحلال الإشعاعى والمنحنى الخطى لاحتراق شمعة.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

تكون كل من النواتين الولودة والوليدة محفوظة فى بناء الشبكة البلورية للمعدن. وتعكس نسبة النويات الولودة إلى النويات الوليدة فى النظام البلورى المغلق طول الفترة الزمنية المنقضية منذ بدأت الساعة الزمنية فى الدوران.

ويتميز كل عنصر مشع بفترة زمنية تسمى **عمر النصف half-life**، وهى الفترة الزمنية اللازمة لأن يتحول نصف عدد ذرات عنصر مشع ما إلى النظير غير المشع. ويحدث التحلل الإشعاعى بمعدل هندسى: أى أن عددًا ما من نويات عنصر مشع معين (N_0) يتبقى نصف عددها مشعا (N/2) بعد مرور فترة عمر نصف واحدة، بينما نصف هذا العدد، أى ربع العدد الأصلى

ويقدر عمر العينة الجيولوجية بالفترة الزمنية المنقضية منذ تبلور الشبكة البلورية للمعدن الحاوى للذرات المشعة. ويكون العمر عند لحظة البداية صفرا، وتكون نسبة ذرات النظير المشع لذرات النظير غير المشع عندئذٍ تساوى صفرا. وتقدر الفترة الزمنية منذ التبلور بقياس نسبة نويات النظير المشع إلى نويات النظير غير المشع فى المعدن. وبالطبع فإن عمر النصف للعنصر المشع يجب أن يكون معلوما ويضرب فى نسبة نويات النظير المشع إلى نويات النظير غير المشع.

وعلى سبيل المثال، فإذا كانت نسبة اليورانيوم-238 إلى الرصاص-206 فى عينة ما تساوى 1:1، فهذا يعنى أن نصف المادة الأصلية من اليورانيوم قد تحللت

إلى رصاص، أى مضت فترة عمر نصف واحدة، وحيث إن عمر النصف لليورانيوم -238 هو 4510 مليون سنة ، فإن هذا سيكون عمر العينة.

جـ- سلاسل الاضمحلال الإشعاعى الرئيسية

قُدّر عمر النصف للنويات المشعة المختلفة باستخدام أدوات تحليل دقيقة فى المعمل. ووجد أن عمر النصف لبعض العناصر يكون أقل من ثانية، بينما يصل عمر بعضها إلى دقائق أو أيام أو سنوات، ويصل فى بعضها الآخر إلى عشرات أو مئات أو حتى آلاف الملايين من السنين؛ فسلسلة تحلل اليورانيوم -238 يتراوح عمر النصف فيها بين 0.00016 ثانية و4500 مليون سنة. ويحتاج تقدير عمر معظم الأحداث الجيولوجية باستخدام المواد المشعة إلى العناصر المشعة التى لها عمر نصف طويل. ويوضح جدول (1.9) النظائر المشعة الرئيسية المستخدمة فى تقدير عمر الصخور القديمة ونظائرها غير المشعة وعمر النصف لها والمعادن أو الصخور الرئيسية التى تحوى هذه العناصر وبعض تطبيقاتها المهمة.

ويعتبر عمر الصخور النارية والمتحولة هو عمر الانصهار حتى نقطة حرجة أساسية يُطلق عليها درجة حرارة التثبيت blocking temperature، حيث يصبح معدن معين نظامًا كيميائيًّا مغلقا فى سلسلة اضمحلال معينة. وتعطى الصخور النارية أفضل النتائج ؛ لأن صخور هذه المجموعة هى نواتج تبلور مصهور سيليكاتى ، ولهذا فهى صخور أولية . كما أن الصخور المتحولة يمكن أن تعطى أعمارا مطلقة أيضا ، ولكن يكون العمر المقدر بهذه الطريقة هو عمر التحول، ولذلك فهى لا تعطى عمر الصخر الأصلى غير المتحول . وتشمل عمليات التحول إعادة بلورة المعادن الموجودة وأيضا تكوين معادن جديدة ، ولذلك فإنها تعيد ضبط ساعة الزمن على البداية الجديدة.

أما الصخور الرسوبية فليست مناسبة للتقدير المطلق باستخدام العناصر المشعة، لأن الحبيبات الفتاتية المكوّنة لها يكون مصدرها أساسا صخور نارية أو متحولة أقدم عمرا. وتقدير عمر زيركون أو ميكروكلين فتاتى سيكون هو عمر الصخر الأصلى النارى أو المتحول الذى أتى منه الزيركون أو الميكروكلين وليس عمر الصخر الرسوبى نفسه. أما معدن الجلوكونيت ، والذى يتكون من سيليكات بوتاسيوم حديد لونها أخضر ، فإنه يتكون كمعدن أولى فى بعض بيئات الترسيب البحرية، ويمكن أن يعطى تقديرات مقبولة للعمر المطلق لبعض الصخور الرسوبية من خلال احتوائه على بوتاسيوم ـ أرجون.

مصادر الخطأ: تأتى أفضل تقديرات العمر المطلق من ربط نتائج سلسلتى اضمحلال بعضها ببعض. فإذا بقيت بلورة تحتوى على عنصر اليوارنيوم فى نظام بلورى مغلق فإن نتائج تقدير عمرها من نسب اليوارنيوم -238: الرصاص -206 واليورانيوم -235: الرصاص-207 ستكون متطابقة. وتأتى أكبر مصادر عدم دقة النتائج فى علم التاريخ الجيولوجى من أن الصخور والمعادن لا تبقى فى أنظمة مغلقة، حيث تفقد النويات الوليدة غالبا مثل الأرجون -40 (لأن الأرجون غاز ومن السهل تطايره). كما قد تختلط النويات الوليدة الناتجة عن الاضمحلال الإشعاعى بنويات العنصر نفسه المتكونة أصلا عند تبلور المعدن فى البداية، مثل نويات الرصاص الناتج عن الاضمحلال (رصاص -206 ورصاص -207 ورصاص -208) والرصاص غير المشع المتكون عند التبلور والمسمى رصاص -204. ولذلك فلابد أن تحدد كميته بدقة فى العينة ، قبل عمل النسبة التى يبنى على أساسها تقدير العمر.

جدول (1.9) أهم العناصر المشعة المستخدمة فى تقدير أعمار الصخور والأحداث الجيولوجية

النظائر		عمر النصف التقريبى	المعادن الرئيسية الحاوية للعنصر المشع	التطبيقات
الأصل	الوليد			
يورانيوم-238	رصاص -206	4510 مليون سنة	زيركون-يورانيت-بتشبلند	تحديد أعمار عينات من القمر والشهب وصخور ما قبل الكمبرى
يورانيوم-235	رصاص-207	713 مليون سنة	مثل يورانيوم-238	مثل يورانيوم-238
يورانيوم-232	رصاص-208	13900 مليون سنة	زيركون-يورانيت	مثل يورانيوم-238
بوتاسيوم -40	أرجون -40	1300 مليون سنة	مسكوفيت -بيوتيت- هورنبلند - جلوكونيت - كل الصخور البركانية أو المتحولة	تحديد أعمار بازلت قيعان المحيطات واللابات وبعض الصخور الرسوبية
روبيديوم-87	استرانشيوم-87	47000 مليون سنة	مسكوفيت وبيوتيت وليبدوليت وميكروكلين وكل الصخور النارية أو المتحولة	تحديد أعمار أقدم صخور القشرة الأرضية والشهب وصخور ما قبل الكمبرى
كربون-14	نيتروجين-14	5730 سنة	المواد ذات الأصل العضوى مثل الأسنان والقطع الخشبية والمياه الجوفية ومياه المحيطات	تحديد أعمار عينات من العصر الرابع (الجزء الأخير) وبقايا الحضارات البشرية

كما قد ينشأ الخطأ أيضا من معامل التحليل نفسها. فتحديد نسبة النويات الولودة إلى النويات الوليدة يتم باستخدام جهاز يطلق عليه مطياف الكتلة mass spectograph، وهو جهاز تحليل على درجة عالية من الحساسية قادر على فصل وقياس نسب الجسيمات الدقيقة حسب الفروق فى كتلتها. وتعتمد درجة الخطأ على كمية النظير المشع والنظير غير المشع وقرينه المتكوّن عند التبلور الأصلى، وأيضا عمر نصف العنصر الولود والعمر الحقيقى للعينة المدروسة.

ولهذا فإن العمر المطلق يعبّر عنه برقم مع إضافة زيادة أو نقص إلى هذا الرقم، فمثلا يكون عمر حدث جيولوجى 250± 20 مليون سنة. وبالإضافة إلى الأخطاء الروتينية وأخطاء التحليل، فإن مدى العمر الناتج يعبّر عن درجة دقة القياس، مثل عينة يتراوح عمرها بين 460 و 490 مليون سنة، وبالتالى فإنك قد تحلل عينة من الصخر نفسه، ويكون عمرها نحو 480 مليون سنة مثلا وهو تقدير يقع فى مدى العمر السابق. وبالتالى فإن الدقة هى مقياس درجة بُعد العمر المقدر عن العمر الحقيقى.

د- تحديد العمر باستخدام الكربون المشع

الكربون عنصر مهم فى الطبيعة، وأيضا فى تقدير عمر المواد العضوية الحديثة جدا. وتحتوى ذرة الكربون العادية على ستة بروتونات وستة نيوترونات فى نواتها، ولهذا فإن عددها الذرى 6 ووزنها الذرى 12. وللكربون نظيران هما كربون ^{13}C وكربون ^{14}C ويتفاعلان كيميائيا مثل الكربون ^{12}C تماما، وكربون 12 و 13 مستقران بينما يكون كربون 14 مشعا. ويختلط ^{14}C مع ^{12}C و ^{13}C وينتشر بسرعة فى الغلاف الجوى والغلاف المائى والغلاف الحيوى. وترجع أهمية ذلك إلى أن النباتات والحيوانات لاتستطيع التمييز بين مختلف أنواع الكربون، وبالتالى تستخدمها جميعا دون تمييز فى تصنيع مختلف المواد العضوية كالسيليلوز أو

فوسفات الكالسيوم فى العظام والأسنان وكربونات الكالسيوم فى الأصداف. ويكون كربون C^{14} غير ثابت ويضمحل بفقد جسيم بيتا من نوياته، ويتكون نتيجة لذلك نواة وليدة هى النيتروجين 14 (شكل 13.9).

ولا يحسب عمر المواد الحاوية للكربون من حساب نسبة الوالد (الكربون 14): نسبة الوليد (النيتروجين 14) كما هو الحال فى تقدير العمر من نسبة اليورانيوم - رصاص. ويعتمد الأساس الذى يقوم عليه تقدير العمر المطلق باستخدام الكربون المشع **Radiocarbon dating** على تحديد نسبة كربون 14 إلى كربون 12 لتقدير عمر المواد التى كانت حية يوما ما، حيث تمتص كل الكائنات الحية كربون 14 المشع مع كربون 12 وكربون 13 بنسبة ثابتة تقريبا.

ولهذا فإن معرفة عمر النصف للكربون 14 والتى تساوى 5730 سنة، ومعرفة ثابت التحلل يجعل عملية حساب زمن موت نبات أو حيوان ما عملية سهلة، من خلال قياس كمية الكربون 14 فى البقايا المتحفرة.

ويقتصر استخدام طريقة الكربون المشع على حد

شكل (**13.9**): دورة الكربون، والتى توضح تكوين وانتشار dispersal وتحلل decay الكربون **14**.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

أقصى للعمر لا يزيد عن 70000 سنة، نظرا لقصر فترة عمر النصف له. ويعتبر الكربون المشع طريقة أساسية لعلم الآثار القديمة وجيولوجية البليستوسين . ومن التطبيقات المبكرة لهذه الطريقة بعد إجازة الطريقة عام 1947م تقدير العمر الدقيق لزحف الجليد القارى فوق أمريكا الشمالية. وقد أظهرت النتائج حدوث التغطية الجليدية قبل 11400 سنة مضت، وهو تقدير يقل بمقدار النصف عن التقدير ، الذى سبق التوصل إليه من استخدام الشواهد الطباقية .

وهناك نظيران مشعان آخران قصيرا العمر استخدما بنجاح فى تقدير عمر الأحداث الجيولوجية الحديثة وهما الثوريوم -230 والبروتكتينيوم -231. فالثوريوم -230 ينتج فى سلسلة تحلل اليورانيوم - 238 وعمر النصف له 75000 سنة. أما البروتكتينيوم -231 فينتج فى سلسلة تحلل اليورانيوم -235 وله عمر نصف 34000 سنة. ويتجمع كلاهما فى رواسب قاع البحر، وبقياس تركيزهما النسبى أو نسبتهما المقارنة فى الطبقات المختلفة للعينات الأسطوانية أثناء حفر بئر ومقارنتها بمحتواهما فى طبقة سطحية يمكن تحديد عمر الطبقات.

هـ - تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار

يمكن استخدام مسارات الانشطار النووى **fission track dating** كطريقة حديثة لتقدير العمر المطلق ثبت نجاحها. وهى عبارة عن ندوب تشبه الأنفاق الدقيقة للغاية التى لا ترى إلا تحت تكبيرات عالية فى بعض بلورات المعادن. وتنتج هذه المسارات عندما تنطلق بعض الجسيمات عالية الطاقة من نويات ذرات اليورانيوم -238 أثناء الانشطار اللحظى إلى نواتين أو أكثر أخف وزنا ، بالإضافة إلى بعض الجسيمات النووية. وتنطلق الجسيمات داخل تركيب الشبكة البلورية للمعدن تاركة بصمة للمسار الذى سلكته، والذى يكون سعته ذرات قليلة. ويكون المعدل الطبيعى لإنتاج مسارات الانشطار فى ذرات اليورانيوم شديد البطء، ويحدث بمعدل ثابت. وبحساب عدد مسارات الانشطار يمكن تحديد عدد الذرات التى اضمحلت فعلا، وبتعريض البلورة لمجال نيوترونى يحدث اضمحلال لبقية الذرات، ثم يعاد عدّ مسارات الانشطار مرة ثانية، وبإيجاد النسبة بين الذرات الوليدة الأولى والذرات الولودة يمكن حساب العمر المطلق.

ويبدو أن معادن مثل الأباتيت والزيركون والسفين تعطى نتائج جيدة ، كما أن هذه الطريقة تستخدم لتحديد أعمار عينات يقل عمرها عن عدة قرون من السنين، كما تستخدم لتحديد أعمار صخور يصل عمرها إلى عدة بلايين من السنين ، إلا أنها أكثر استخداما لتقدير عمر عينات تتراوح بين نحو 40000 سنة إلى مليون سنة مضت ، وهى فترة زمنية لا تستخدم فيها التقنيات الأخرى بصورة عملية . ولكن هذه الطريقة كغيرها من طرق قياس العمر المطلق لها عوامل محددة . فدرجات الحرارة العالية يمكن أن تؤدى إلى اختفاء المسارات ، كما يمكن أن يؤدى قذف الأشعة الكونية إلى زيادة سرعة الانشطار ، مما يؤدى إلى تقديرات خاطئة .

و- تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية

إن تحديد العمر المطلق باستخدام الأحماض الأمينية **amino acids dating** يعتبر طريقة أخرى حديثة ، تعتمد على تحليل نسبة الحمض الأمينى-D إلى الحمض الأمينى-L فى عظام حفريات ومواد أصداف العصر الرابع Quaternary ، حيث ثبت جدواها . وقد أثبتت الأبحاث التى أجريت فى سبعينيات القرن الماضى أن عملية تدعى تفاعل ريسمة الحمض الأمينى amino acid racemization reaction يمكن استخدامها بمحاذير معينة ، عند تحديد عمر

مادة هيكلية ، حيث إن الأحماض الأمينية المعروفة بـ L-amino acids توجد فقط فى بروتينات الكائنات الحية . وعندما يموت الكائن وتمضى فترة زمنية تتحول هذه L-amino acids إلى الأحماض الأمينية غير البروتينية والمعروفة بـ D-amino acids خلال عملية تعرف بالريسمة racemization . وتزيد بثبات نسبة D-amino acids إلى L-amino acids فى المادة الهيكلية مع الزمن حتى تصل هذه النسبة L/D إلى 1.0 . أما إذا زادت عن ذلك فتصبح النسبة زائفة ؛ لأنه عكس سلاسل الاضمحلال الإشعاعى فإن التفاعل يكون عكسيًا . وبتحديد المدى الذى وصلت إليه عملية الريسمة فى عينة المادة الهيكلية ، يمكن تحديد عمرها، آخذين فى الاعتبار أنه يمكن معايرة العينة بعينة أخرى محددة العمر سلفا.

وبمقارنة طريقة الريسمة هذه بطريقة الكربون المشع، يتضح أننا نحتاج فى هذه الطريقة إلى مقدار أقل من المادة العضوية ، كما تطبق فى مجالات أوسع من طريقة الكربون المشع . فهى تطبق فى تحديد أعمار الحفريات البشرية المبكرة والشرفات البحرية ، التى تكونت خلال مئات الآلاف من السنين الأخيرة .

IV. العمود الجيولوجى ومقياس الزمن الجيولوجى

إن أحد الإنجازات الكبيرة التى توصل إليها جيولوجيو القرن التاسع عشر من خلال عملية المضاهاة أنه يمكن الربط بين التتابعات الطبقية التابعة لزمن واحد. ولقد تمكن هؤلاء الجيولوجيون ـ ومن خلال عملية المضاهاة على مستوى العالم ـ من جمع عمود جيولوجى **geologic column** ، هو عبارة عن قطاع رأسى مركب، يحتوى تتابع الطبقات المعروفة فى ترتيب زمنى على أساس محتواها الحفرى، أو أى أدلة أخرى على العمر النسبى . وما زال يضاف إلى هذا المقياس العالمى، أو يتم إدخال تحسينات عليه حتى الآن، نتيجة وصف أو رسم خرائط لوحدات صخرية أكثر .

ويقسم الجيولوجيون كل التاريخ الجيولوجى إلى وحدات مختلفة المدى الزمنى تقابل الوحدات الصخرية للعمود الجيولوجى. وتشمل فى مجموعها **مقياس الزمن الجيولوجى geologic time scale** لتاريخ الأرض (جدول 2.9). وقد أدخلت وحدات مقياس الزمن الرئيسية خلال القرن التاسع عشر على يد علماء من غرب أوروبا وبريطانيا ؛ ونظرًا لأن تحديد العمر المطلق باستخدام المواد المشعة لم يكن معروفًا فى ذلك الوقت، فإن مقياس الزمن قد أقيم باستخدام طرق قياس العمر النسبى. وقد أضيفت التقديرات المطلقة لوحدات مقياس الزمن بعد إجازتها فى القرن العشرين.

أ- بناء مقياس الزمن الجيولوجى

يقسم مقياس الزمن الجيولوجى 4.6 بليون سنة والتى تمثل تاريخ الأرض إلى وحدات مختلفة وهى الدهور والأحقاب والعصور والأحايين ، ويقدم إطارا زمنيًا معقولاً ترتب داخله الأحداث الجيولوجية المختلفة منذ نشأة الأرض وإلى الآن. وكما يتضح من شكل مقياس الزمن الجيولوجى ، فإن الدهور **eons** هى أكبر وحدات الزمن . ويشمل الدهر الذى بدأ قبل 570 مليون سنة **دهر الحياة الظاهرة Phanerozoic Eon** وهو مصطلح مشتق من الكلمات اللاتينية التى تعنى حياة ظاهرة ، وهو وصف مناسب ؛ لأن صخور ورواسب ذلك الدهر تحوى الكثير من الحفريات التى تسجل الاتجاهات التطورية الرئيسية فى الحياة .

ويقسم دهر الحياة الظاهرة إلى ثلاثة **أحقاب eras** هى: حقب الحياة القديمة **Paleozoic Era** (يعنى مقطع paleo قديم ويعنى مقطع zoe حياة)، وحقب الحياة المتوسطة **Mesozoic Era** (يعنى مقطع

meso وسطى ويعنى مقطع zoe حياة) وحقب الحياة الحديثة **Cenozoic Era** (يعنى مقطع ceno حديث ويعنى مقطع zoe حياة) . وتعكس هذه الأسماء اختلافات واضحة فى شكل الحياة على مستوى العالم عند الحدود بين الأحقاب . وينقسم كل حقب من الأحقاب الثلاثة إلى وحدات زمنية تسمى عصور **periods** . وينقسم حقب الحياة القديمة Paleozoic Era إلى ستة عصور ، كما ينقسم حقب الحياة الوسطى إلى ثلاثة عصور ، وحقب الحياة الحديثة إلى عصرين . وتختلف الحياة من عصر إلى عصر ، إلا أن هذه الاختلافات تقل عن تلك الاختلافات التى توجد بين حقب وحقب . كما يقسم كل عصر من العصور إلى أقسام أصغر يطلق عليها الأحيان **epochs** ، بينما يقسم الحين إلى أعمار **ages** (جدول 2.9) . ويوضح جدول (3.9) أحقاب وعصور دهر الحياة الظاهرة ، مع بيان مختصر لأصل أسماء مختلف الوحدات .

جدول (**2.9**) مقياس الزمن الجيولوجي (تمثل الأعداد العمر بملايين السنين قبل الآن (م.س) وقد أضيفت تلك الأعمار بعد وضع مقياس الزمن الجيولوجي بوقت طويل اعتمادا على الطرق المطلقة)

دهر	حقب	عصر	حين	العمر (م.س.)	تطور النباتات والحيوانات
الحياة الظاهرة	الحياة الحديثة	الرابع	الهولوسين	0.01	ظهور الإنسان
			البليستوسين	1.8	
		الثالث	البليوسين	5.3	عصر الثدييات
			الميوسين	24	
			الاوليجوسين	37	
			الأيوسين	58	انقراض الديناصورات وكثير من الأنواع الأخرى
			الباليوسين	65	
	الحياة الوسطى	الطباشيرى	عصر الزواحف	135	ظهور النباتات الزهرية
		الجوراسى		180	ظهور الطيور
		الترياسى		225	سيادة الديناصورات
	الحياة القديمة	البرمى	عصر البرمائيات	265	بداية الزواحف
		الكربونى		345	مستنقعات الفحم الضخمة انتشار البرمائيات
		الديفونى	عصر الأسماك		بداية الحشرات سيادة الأسماك
		السيلورى		400	بداية النباتات القارية
		الأوردوفيشى	عصر اللافقاريات	430	بداية الأسماك
		الكمبرى		500	سيادة ثلاثية الفصوص بداية الكائنات الهيكلية
البروتيروزوى	يطلق عليه ما قبل الكمبرى ويشمل 87 ٪ من عمر الأرض			570	بداية الكائنات عديدة الخلايا
الأركى				2500	بداية الكائنات وحيدة الخلايا أقدم الصخور
الهاديان				3800	نشأة الأرض
				4600	

فترة ما قبل الكمبرى Precambrian time

لا يمكن عمل تقسيم تفصيلي لمقياس الزمن الجيولوجي إلا في 570 مليون سنة الأخيرة من عمر الأرض، والتي تحتوى على بقايا الحياة الهيكلية المعقدة، وتمتد من بداية العصر الكمبرى حتى الآن. وتقسم الأربعة بلايين سنة من عمر الأرض، والتي تسبق العصر الكمبرى إلى ثلاثة دهور وهي الهاديان **Hadean** (تعني كلمة Haides عالم الأساطير الخفي للأرواح الراحلة)، والأركي **Archean** (وتعني كلمة archaios القديم أو السحيق)، والبروتيروزوى **Proterozoic** (وتعني كلمة proteros قبل و zoe تعني حياة). وكثيرًا مايطلق على هذه الفترة الزمنية الطويلة من عمر الأرض وبصورة غير رسمية مصطلح ماقبل الكمبرى Precambrian. وعلى الرغم من أنه يمثل نحو 87 ٪ من عمر الأرض، إلا أنه لا يقسم إلى أقسام كثيرة كتلك التي تكون في دهر الحياة الظاهرة.

جدول (3.9): أصل أسماء وحدات دهر الحياة الظاهرة

حقب	عصر	حين	أصل الاسم
الحياة الحديثة Cenozoic	الرابع Quaternary	الحديث Holocene	يونانية بمعنى كامل الحداثة
		البليستوسين Pleistocene	يونانية بمعنى الأقصى حداثة
	الثالث Tertiary	البليوسين Pliocene	يونانية بمعنى الأكثر حداثة
		الميوسين Miocene	يونانية بمعنى الأقل حداثة
		الأوليجوسين Oligocene	يونانية بمعنى الحديث قليلا
		الأيوسين Eocene	يونانية بمعنى فجر الحديث
		الباليوسين Paleocene	يونانية بمعنى الفجر المبكر للحديث
الحياة الوسطى Mesozoic	الطباشيرى Cretaceous	يستخدم اسم الحين فقط من قبل المتخصصين	مشتقة من اللفظ اللاتيني creta بمعنى طباشير حيث ظهرت جروف الطباشير في جنوب إنجلترا
	الجوراسى Jurassic		جبال جورا بين سويسرا وفرنسا
	الترياسى Triassic		أخذت من كلمة Trias بمعنى ثلاثي، حيث تنقسم صخور العصر في ألمانيا إلى ثلاثة أقسام
الحياة القديمة Paleozoic	البرمى Permian		منطقة بيرم في روسيا
	الكربونى Carboniferous		أخذت من كلمة charbon بمعنى فحم بالفرنسية، حيث توجد طبقات الفحم في صخور هذا العصر.
	الديفونى Devonian		اسم مقاطعة ديفونشاير في جنوب غرب انجلترا
	السيلورى Silurian		السيلور قبيلة قديمة كانت تسكن ويلز
	الأوردوفيشى Ordovician		الأوردوفيش قبيلة قديمة كانت تسكن ويلز
	الكمبرى Cambrian		كامبريا هو الاسم الروماني القديم لمقاطعة ويلز

ويرجع السبب فى عدم تقسيم الفترة الزمنية الطويلة التى يشملها ما قبل الكمبرى إلى أحقاب وعصور وأحيان كثيرة إلى أننا لا نعرف كثيرًا عن تاريخ ما قبل الكمبرى . وتماثل كمية المعلومات التى توصل إليها الجيولوجيون عن ماضى الأرض ماعرفوه عن تاريخ البشر. وكلما تعمقنا أكثر فى الماضى قلت المعلومات التى نستطيع الإلمام بها . وبالطبع سجلت أحداث القرن التاسع عشر بشكل أفضل من أحداث القرن الأول الميلادى، وهكذا . وهذا ينسحب بالطبع على تاريخ الأرض ، إذ كلما قدم الحدث كان أكثر تشوشا وأقل وضوحا. وهناك أسباب أخرى لتفسير نقص معلوماتنا عن تلك الفترة الزمنية من تاريخ الأرض والتى يشملها "ما قبل الكمبرى" ، منها:

1- لم يبدأ الانتشار الواسع للحياة فى السجل الجيولوجى إلا من بداية العصر الكمبرى. أما ما قبل الكمبرى فقد انتشرت أشكال بسيطة من الأحياء مثل : البكتريا والطحالب والفطريات والديدان. وهى أشكال من الأحياء لا تحتوى على هيكل صلب ، والذى يمثل أحد المتطلبات الأساسية لحفظ الكائنات الحية كحفريات. ولهذا السبب فإن السجل الحفرى فى ما قبل الكمبرى يعدّ هزيلا.

2- ولأن صخور ما قبل الكمبرى شديدة القدم فقد تعرض معظمها لتغيرات كثيرة وشديدة. حيث يتكون معظم السجل الصخرى فى ما قبل الكمبرى من صخور متحولة مشوهة بشدة. مما يجعل البيئة القديمة شديد الصعوبة نظرا لتشوه كل الشواهد التى كانت تميز الصخور الرسوبية.

وقد أمدتنا المواد المشعة بحل جزئى لمشكلة تحديد أعمار ومضاهاة صخور ما قبل الكمبرى، إلا أن عدم حل تعقيدات ما قبل الكمبرى يظل أمرا مثبطا للهمم.

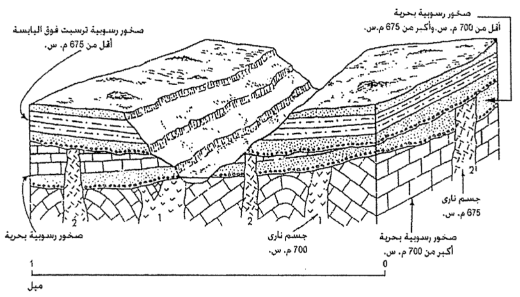
ب- مشكلات تحديد الأعمار فى مقياس الزمن الجيولوجى

على الرغم من أنه أمكن التوصل إلى تقديرات دقيقة لأعمار مختلف أقسام العمود الجيولوجى، فإن هذا لا يعنى أن الأمر يخلو من صعوبات. وتكمن الصعوبة الأولى فى وضع تقدير دقيق للعمر فى أنه لا يمكن تقدير عمر كل الصخور باستخدام الطرق الإشعاعية ، وذلك يرجع إلى أنه لكى تكون عملية التقدير دقيقة، فلابد أن تكون كل المعادن الموجودة فى الصخر قد تكونت فى وقت واحد. ولهذا السبب، فإننا نستخدم النظائر المشعة لتحديد متى تبلورت المعادن المكوّنة للصخر النارى، ومتى وصلت درجة الحرارة والضغط إلى الحد ، الذى يساعد على تكوين معادن جديدة فى الصخر المتحول.

أما الصخور الرسوبية فإنها نادرا ما يمكن تحديد عمرها باستخدام المواد المشعة مباشرة. وعلى الرغم من أن الصخور الرسوبية الفتاتية قد تحتوى على حبيبات بها نظائر مشعة، إلا أن عمر الصخر نفسه لا يمكن تحديده بطريقة دقيقة، لأن الحبيبات المكوّنة للصخر لا تنتمى إلى عمره نفسه. كما أن الرواسب تأتى من صخور مختلفة العمر بالتجوية. كما أن الأعمار المقدرة من الصخور المتحولة قد يصعب تفسيرها؛ لأن عمر معدن معين فى الصخر المتحول لا يمثل بالضرورة عمر تكوين الصخر الأصلى، بل قد يمثل مرحلة من مراحل التحول اللاحقة. أما إذا كان الصخر الرسوبى لا يحتوى على مواد مشعة مناسبة لتقدير عمره المطلق، فإنه يتحتم على الجيولوجى ربط الطبقات الرسوبية بأجسام نارية يمكن تحديد أعمارها المطلقة، حيث تكون الطبقات الرسوبية أقدم عمرًا من الجسم النارى القاطع له، كما تكون أحدث عمرًا من الأجسام النارية غير المتأثرة بها فى التتابع نفسه (شكل 14.9).

ومن مثل هذا النوع من الشواهد ، يمكن للجيولوجى أن يقدر عمر الصخور الرسوبية تقديرا

مطلقا. كما يتضح مدى أهمية الربط بين الدراسات المعملية والمشاهدات الحقلية عند القيام بهذه المهمة.



شكل (14.9): تقدير العمر المطلق للصخور الرسوبية بتقدير عمر الصخور النارية المصاحبة لها .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

V. التصنيف الطبقى (الاستراتجرافى)

تضم الوحدات الطبقية (الاستراتجرافية) stratigraphic units مجموعة الطبقات التى يمكن تقسيمها بناءً على خصائصها الطبيعية أو الكيميائية أو محتواها من الحفريات. كما تشمل تلك الوحدات أيضا وحدات زمنية time units يتم وضعها بناءً على أعمار هذه الطبقات. ولقد تنبه العلماء فى أواخر القرن التاسع عشر إلى أهمية فصل مفهوم الزمن الجيولوجى وتقسيماته عن أقسام الصخور، التى ترسبت خلال هذا الزمن. ولقد أدى هذا الفصل إلى نشأة وحدات الزمن الجيولوجى geologic time units والتى تشمل مختلف عصور periods الزمن الجيولوجى، وأيضا الوحدات الزمنية الصخرية **time- rock units** والتى تشمل أنظمة systems الصخور التى تكونت خلال هذه العصور (جدول 4.9) .

وقد قام الجيولوجيون فى مختلف أنحاء العالم منذ نهاية القرن التاسع عشر، وخلال القرن العشرين، بعمل شبكات من المضاهاه الاستراتجرافية وعمل تدقيق لمقياس الزمن الجيولوجى، إلا أنهم استخدموا مصطلحات ومفاهيم مختلفة مما أدى إلى حدوث كثير من اللبس. وللقضاء على هذا اللبس ولوضع قواعد ثابتة لتسمية الوحدات الطبقية الرسمية ، عقد عديد من المؤتمرات العملية المحلية والدولية. وفى إطار هذا الاهتمام وبالتعاون بين جمعية أمريكا الشمالية للتسمية الطبقية North American Commission on Stratigraphic Nomenclature والجمعية الأمريكية للجيولوجيين العاملين فى البترول American Association of Petroleum Geologists تم نشر عدد من طبعات "دليل التسمية الطبقية Code of Stratigraphic Nomenclature". وقد وضع هذا الدليل (الكود) فى الأساس ليضع قواعد تسمية الوحدات الاستراتجرافية الرسمية المختلفة، مما يعمل على سهولة

جدول (4.9): تصنيف الوحدات الطبقية متبوعة بالوحدة الأساسية ، كما نشرت فى دليل (كود) التسمية الطبقية لشمال أمريكا عام 1986م .

	نوع الوحدة	الوحدة الأساسية
I. وحدات مادية	أ. وحدات طبقية صخرية Lithostratigraphic	متكوّن Formation
	ب. وحدات صخرية لاطباقية Lithodemic	جسم صخرى Lithodemic
	ج. قطبية مغناطيسية Magnetopolarity	نطاق قطبية Polarity zone
	د. وحدات طبقية حيوية Biostratigraphic	نطاق حيوى Biozone
	هـ. وحدة تربة صخرية Pedostratigraphic	جيوسول Geosol
II. وحدات متصلة بالزمن الجيولوجى	أ. وحدات زمنية Time units	
	1.وحدات الزمن الجيولوجى Geochronologic	عصر Period
	2. قطبية – زمنية Polarity-Chronologic	زمن قطبى Polarity Chron
	ب. وحدات مادية ترسبت خلال فترة زمنية محددة	
	1. وحدات طبقية زمنية Chronostratigraphic	نظام System
	2. قطبية زمنية طباقية Polarity- chronostratigraphic	نطاق زمن قطبية Polarity chronozone

التواصل بين الجيولوجيين. ويشمل هذا الدليل خمسة أنواع من الوحدات، وهى: وحدات الزمن الجيولوجى geochronologic units أو time units والوحدات الطبقية الزمنية chronostratigraphic units أو time rock units والوحدات الطبقية الصخرية lithostratigraphic units أو rock units والوحدات الطبقية الحيوية biostratigraphic units ووحدات القطبية المغناطيسية الطبقية polarity chronostratigraphic units أو time – rock polarity.

ويقسم الزمن الجيولوجى إلى وحدات غير متساوية بناءً على طول الأحداث الجيولوجية المختلفة، وتشمل وحدات الزمن الجيولوجى time units: الدهر eon والحقب era والعصر period والحين epoch والعمر age، مرتبة من الأطول إلى الأقصر. ويعتبر العصر period الوحدة الزمنية الأساسية. أما الوحدات الطبقية الزمنية time – rock units فتشمل الصخور التى ترسبت خلال الفترة الزمنية المساوية لوحدة الزمن الجيولوجى المقابلة لها. وهى تشمل وحدة صخور الدهر eonothem وتقابل الدهر، والتجمع أو صخور الحقب erathem ويقابل الحقب ، والنظام system ويقابل العصر ، والنسق series ويقابل الحين ، والمرحلة stage وتقابل العمر ، (جدول 5.9) . وتأخذ كل وحدتين متقابلتين من الوحدات السابقة اسما واحدا ؛ فمصطلح الكمبرى Cambrian يطلق على العصر الكمبرى Cambrian Period والذى يشمل الفترة الزمنية الممتدة بين نحو 570 إلى 500 مليون سنة مضت، بينما يشير مصطلح نظام الكمبرى Cambrian system إلى كل الصخور التى ترسبت خلال تلك الفترة الزمنية.

أما الوحدات الطبقية الصخرية ، أو باختصار الوحدات الصخرية rock units ، فتعبر عن تقسيم التتابع الطبقى بناءً على صفاته الصخرية ، بصرف النظر عن زمن تكوين هذه الصخور أو طريقة تكوينها .

جدول (5.9): مقارنة المصطلحات المستخدمة لوحدات الزمن الجيولوجى والوحدات الطبقية الزمنية

وحدات زمنية	وحدات طبقية زمنية
Eon دهر	Eonothem صخور الدهر
Era حقب	Erathem صخور الحقب
Period عصر	System نظام
Epoch حين	Series نسق
Age عمر	Stage مرحلة

وتشمل الوحدات الصخرية فوق المجموعة supergroup والمجموعة group والمتكوّن formation والعضو member والطبقة bed . والوحدة الرئيسية فى هذا التصنيف هى المتكوّن **formation**. ويضم المتكوّن مجموعة من الطبقات التى لها نفس الخصائص الصخرية ، وتحتوى عادة على نفس المجموعة من الحفريات . وقد تتكون بعض المتكوّنات من نوع صخرى واحد مثل الحجر الجيرى ، بينما تتكون مكونات أخرى من طبقات رقيقة متبادلة من أنواع مختلفة من الصخور مثل الحجر الرملى والطفلى . وعلى الرغم من هذا الاختلاف، فإن كل متكوّن يحتوى على مجموعة من الطبقات الصخرية التى يمكن تتبعها على الخرائط الجيولوجية ذات مقياس الرسم المناسب (فى حدود 1: 25000). ويسمى المتكوّن باسم بعض المعالم الجغرافية المحلية مثل الأنهار أو المدن أو غيرها ، مثل متكوّن وادى النطرون Wadi Natrun Formation أو اسم صخر معين مثل طفل إسنا Esna Shale Formation . كما يجب أن يختار للمتكوّن منطقة مرجعية يوجد بها المتكوّن بشكل كامل. وعند كتابة المصطلح باللغة الإنجليزية تكتب الحروف الأولى كبيرة. ويجب اتباع النظام نفسه عند تسمية بقية الوحدات الصخرية مثل فوق المجموعة أو المجموعة أو العضو.

أما الوحدات الطبقية الحيوية فتقوم على أساس تقسيم التتابعات الطبقية على أساس محتواها من الحفريات . والوحدة الأساسية للوحدات الحيوية هى النطاق الحيوى biozone وهى طبقة أو مجموعة من الطبقات ، تتميز بوجود نوع معين وحيد أو مجموعة مميزة من الحفريات ، بغض النظر عن حدود النوعية الصخرية الحاوية لها أو العمر. وقد تتطابق حدود النوع الحيوى مع حدود الوحدات الطبقية الأخرى وقد لاتتطابق . وإذا دلت الحفرية أو مجموعة الحفريات الدالة index fossils على زمن معين، سمى النطاق بالنطاق الزمنى chronozone. ويختلف نوع النطاق بناءً على اختلاف درجة الدلالة الزمنية لمجموعة الحفريات المميزة للنطاق، فمنها نطاق المدى range zone ، الذى يتحدد من بداية ظهور حتى اختفاء عنصر حفرى واحد يميزه، ومنها نطاق المجموعة assemblage zone الذى يتحدد من بداية ظهور عنصرين حفريين أو أكثر حتى اختفائها. كما قد يكون نطاق وفرة acme zone وهو نطاق يتحدد من بداية انتشار ووفرة مجموعة حفرية معينة حتى تناقصها . ويسمى النطاق باسم المجموعة الحفرية الدالة عليه.

أما وحدات القطبية المغناطيسية الطبقية polarity time– rock units (magnetostratigraphic units) فهى وحدات حديثة نسبيا، وتقوم على بصمات المغناطيسية القديمة **paleomagnetism** المتبقية فى

الصخور ، والتى تقاس بهدف تحديد شدة واتجاه مجال الأرض المغناطيسى فى الأزمنة الجيولوجية الماضية؛ حيث تشبه المغناطيسية المتحفرة فى الصخور والتى يعبر عنها بنطاق قطبية polarity zone الحفريات المحتواة فى الطبقات . وللبصمة المغناطيسية أهمية زمنية يعبر عنها كنطاق قطبية زمنى polarity chronozone . وهذه الأهمية الزمنية لأحداث المغناطيسية القديمة وفترات القطبية تمكننا من بناء مقياس زمنى بناءً على القطبية القديمة ، والذى يظهر اتجاه القطبية القديمة المحفوظة فى نوعيات مختلفة من الصخور، مثل : انسيابات اللابة القارية وبازلت قاع المحيط ورواسب البحار العميقة. وتساعد المواد المشعة فى تحديد العمر المطلق لأحداث المغناطيسية القديمة، والتى يطلق عليها وحدات قطبية زمنية polarity chronologic units. وفى الرواسب البحرية العميقة يمكن تحديد العمر الدقيق لوحدات القطبية من ربطها بالنطاقات الحيوية.

وبالتالى ، فإن المغناطيسية القديمة خاصية فى الصخور تظهر تتابعا زمنيا، ويمكن استخدامها فى عمل مضاهاة زمنية بين التتابعات الطبقية. فإذا أمكن تعرف أحداث مغناطيسية قديمة وكان من الممكن ربطها بوسائل أخرى للمضاهاة، أصبحت لدينا وسيلة جيدة لمضاهاة الرواسب البحرية العميقة على مستوى عالمى (شكل 9.9). وقد ثبت أن المغناطيسية القديمة طريقة ممتازة لعمل تقسيم طبقى زمنى لصخور حقب الحياة الحديثة والنصف العلوى من حقب الحياة الوسطى، إلا أن تطبيقه على الصخور الأقدم من ذلك تفتقر لوجود قطاعات مرجعية جيدة على مستوى الكرة الأرضية ككل. بمعنى آخر، فإن المقياس الزمنى للمغناطيسية القديمة يطبق فقط على الصخور التى ترسبت فقط على قيعان المحيطات الحديثة. وفى الآونة الأخيرة، ومع وجود أجهزة قياس المغناطيسية (مجنيتوميترات) على درجة عالية من الدقة والحساسية، يمكن تحديد أحداث المغناطيسية القديمة لكثير من التتابعات الطبقية فى قيعان المحيطات، ومعايرة هذه الأحداث بتقديرات الأعمار المطلقة باستخدام المواد المشعة ؛ حيث يمكن تحديد عمر الصخور التى لا تحتوى على حفريات مرشدة.

الملخص

1. علم طبقات الأرض (الاستراتجرافيا) هو دراسة الطبقات الصخرية، ليس فقط من ناحية تتابعها وترتيبها وعمرها، بل من ناحية شكلها وتوزيعها وتركيبها الصخرى، ومحتواها الحفرى، بالإضافة إلى خصائصها الكيميائية والفيزيائية.

2. يستخدم الجيولوجيون لتفسير تاريخ الأرض نوعين من تقدير الزمن ، هما : العمر النسبى والعمر المطلق . وفى العمر النسبى يتم ترتيب الأحداث الجيولوجية حسب تاريخ وقوعها من الأقدم إلى الأحدث. أما العمر المطلق فيعبر عن تقدير لعدد السنين ، التى انقضت منذ وقوع الحدث الجيولوجى.

3. يتم تقدير العمر النسبى بناءً على عدد من القوانين أو القواعد : وهى أن معظم الطبقات قد ترسبت أفقيا (قاعدة الأفقية الأصلية)، كما تجمعت كل الطبقات فى تتابع تكون الطبقات الأقدم لأسفل والأحدث لأعلى (قاعدة تتابع الطبقات). ويتم ترسيب الطبقات فى طبقات متصلة عبر حوض رسوبى حيث يمكن مقارنتها ومضاهاتها فى مسافة (قاعدة الاستمرارية الجانبية الأصلية). كما أن أى شيء يقطع طبقة من الصخور الرسوبية أو أى نوع من الصخور يكون أحدث عمرا من

الطبقة الرسوبية أو تلك الصخور (قاعدة علاقات القطع المستعرض). ويعتبر الفتات والحبيبات التى توجد فى صخر أقدم عمرا من الصخر نفسه (قاعدة المكتنفات). وتستخدم الحفريات فى تحديد أعمار الطبقات والمضاهاة (قاعدة التتابع الحفرى) . وتستخدم البصمات المغناطيسية القديمة ، والتى تحدث نتيجة انقلاب القطبية للمجال المغناطيسى عبر الزمان ، فى تقسيم التتابعات الطبقية والمضاهاة بينها.

4. تمثل علاقات عدم التوافق عبارة عن فواصل طبيعية فى التتابعات الطبقية، فترة زمنية توقف فيها الترسيب ، أو أزالت التعرية جزءا من الطبقات التى سبق ترسيبها. وينتج عدم التوافق الزاوى من تأثر مجموعة طبقات بنشاط تكتونى بعد تكوّنها وقبل ترسيب مجموعة طبقات جديدة.

5. تقوم عملية مضاهاة الطبقات بين موضع وآخر على مجموعة الصفات الفيزيائية والبيولوجية المميزة للفترة الزمنية المحددة. وتكون المضاهاة أكثر مصداقية كلما زادت مجموعة الصفات المستخدمة فى إجراء المضاهاة.

6. يقدر العمر المطلق باستخدام ظاهرة الإشعاع ، وهى قدرة نويات الذرات غير الثابتة على التحلل التلقائى بإطلاق جسيمات ألفا أو بيتا أو باكتساب إلكترون. وللعنصر المشع نظائر تتفق فى عدد البروتونات وتختلف فى عدد النيوترونات الموجودة فى نوياتها، ولذلك فهى تتفق فى العدد الذرى وتختلف فى رقم الكتلة.

7. يتحدد عمر العينة من معرفة عمر النصف للعنصر المشع، وقياس نسبة الولود/ الوليد. وعمر النصف half life وهو الفترة الزمنية اللازمة لتحلل نصف وزن المادة المشعة إلى نظيرها غير المشع، وهى مميزة لكل عنصر على حدة.

8. هناك أربع طرق لقياس عمر الصخور النارية والمتحولة القديمة وهى طريقة : اليورانيوم-238/ رصاص-206 ، واليورانيوم -235/ رصاص -207 ، والبوتاسيوم -40/ ، ارجون-40 والروبيديوم -87/ استرانشيوم-87. أما المواد المشعة قصيرة العمر والتى تستخدم فى تحديد عمر أحداث جيولوجية حديثة ، فتشمل: الكربون -14 والثوريوم -230 ، والبروتكتينيوم-231.

9. يقسم مقياس الزمن الجيولوجى (العمود الجيولوجى) تاريخ الأرض إلى أقسام غير متساوية يطلق على كل منها مصطلح دهر وهى الهاديان والأركى والبروتيروزوى التى يشملها جميعا مصطلح ما قبل الكمبرى، ثم الفانيروزوى أو دهر الحياة الظاهرة، والذى بدأ قبل 570 مليون سنة. وينقسم دهر الحياة الظاهرة إلى ثلاث أحقاب وهى حقب: الحياة القديمة، والوسطى، والحديثة.

10. يتم تحديد معظم الأعمار المطلقة للصخور الرسوبية وما تحتويه من حفريات بطريقة غير مباشرة عن طريق تحديد عمر الصخور النارية أو المتحولة المصاحبة.

11. وضع دليل التسمية الطبقية القواعد الأساسية للتصنيف الطبقى وتسمية الوحدات الطبقية المختلفة. وهذه الوحدات خمسة أنواع ، هى : وحدات الزمن الجيولوجى ، والوحدات الطبقية الزمنية ، والوحدات الطبقية الصخرية ، والوحدات الطبقية الحيوية ، ووخدات القطبية المغناطيسية الطبقية.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://members.aol.com/fostrak/paletime.htm
http://www.talkorigins.org/
http://www2.waikato.ac.nz/c14/webinfo/index.html
http://members.aol.com/fostrak/paleeduc.htm
http://www.isgs.uiuc.edu/dinos/dinos_home.html

المصطلحات المهمة

absolute time	عمر مطلق	isotope	نظير
ages	أعمار	Mesozoic Era	حقب الحياة المتوسطة
amino acids dating	تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية	nonconformity	عدم توافق تباينى
angular unconformity	عدم التوافق الزاوى	original horizontality, principle of	الأفقية الأصلية ، قاعدة
Archean Eon	دهر الأركى	original lateral continuity, principle of	الاستمرارية الجانبية الأصلية ، قاعدة
Cenozoic Era	حقب الحياة الحديثة	paleomagnetism	المغناطيسية الأرضية القديمة
correlation	مضاهاة	Paleozoic Era	حقب الحياة القديمة
cross-cutting relationship principle of	علاقة القطع المستعرض قاعدة	paraconformity	شبه التوافق
daughter	وليد	parent	الولود
disconformity	شبه توافق	period	عصر
eon	دهر	Phanerozoic Eon	دهر الحياة الظاهرة
epoch	حين	Proterozoic Eon	دهر البروتيروزوى
era	حقب	radioactive decay	اضمحلال إشعاعى
fission track dating	تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار	radioactive emission	انبعاث إشعاعى
formation	متكوّن	radioactivity	الإشعاع الذرى
fossil	حفرية	radiocarbon dating	تحديد العمر باستخدام الكربون المشع
fossil succession, principle of	التتابع الحفرى ، قاعدة	relative time	العمر النسبى
geologic column	عمود جيولوجى	stratigraphic sequences	تتابعات طبقية
geologic time scale	مقياس الزمن الجيولوجى	stratigrpahic superposition, principle of	تعاقب الطبقات ، قاعدة
Hadean Eon	دهر الهاديان	stratigraphy	علم الطبقات
half-life	عمر النصف	time- rock units	وحدات زمنية صخرية
hiatus	ثغرة ترسب (ثلمة)	unconformity	عدم توافق
inclusions, principle of	المكتنفات ، قاعدة		
index fossil	حفرية دالة		

الأســـئلة

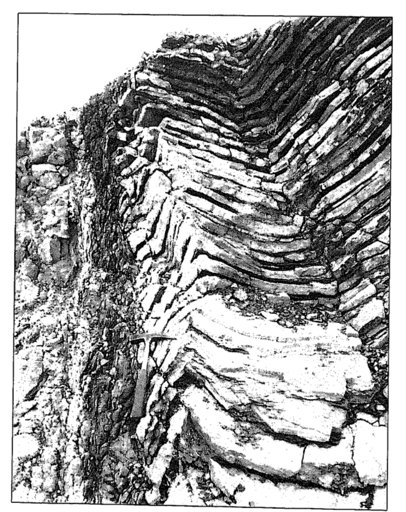
1. اذكر أنواع المضاهاة التـى يمكـن للجيولـوجى أن يقوم بها.
2. ماالفرق بين العمر النسبى والعمر المطلق؟
3. اذكـر أنـواع عـدم التوافـق ، موضـحا إجابتـك بالرسم.
4. ماالقسم من العمود الجيولـوجى الـذى يـستخدم طريقة الكربون المشع فى تقدير عمر أحداثه؟
5. ماالشواهد التى تستخدم فى التفريـق بـين الـسطح العلوى والسفلى للطبقات؟
6. ناقش ثلاثًا من القواعـد التـى تـستخدم فى تقـدير العمر النسبى.
7. ما أنواع الصخور التى يـستخدم الاسترانـشيوم فى تقدير أعمارها؟
8. ناقش الأساس العلمى الذى قامـت عليـه طريقـة تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية.
9. نـاقش الوحـدات الطبقيـة التـى يـشملها العمـود الجيولوجى.

الفصل 10

تشوه الصخور : الطيات والصدوع وتراكيب أخرى كسجل لتشوه الصخور

I. كيف تتشوه الصخور؟ :
أ. الإجهاد والانفعال
ب. مراحل التشوه :
1. التشوه المرن
2. التشوه اللدن
3. التكسر
جـ. المواد اللدنة والمواد القصفة (سريعة الكسر) :
1. الحرارة
2. الإجهاد الحابس
3. الزمن والانفعال
4. التركيب
د. صفات التقصف واللدونة فى الغلاف الصخرى
II. تفسير نتائج الحقل :
أ. قياس المضرب والميل
ب. عمل خريطة جيولوجية وقطاع عرضى
III. التشوه بالثنى: طى الصخور :
أ. أنواع الطيات
ب. الاستنتاجات من طى الصخور
IV. التشوه بالكسر: الفواصل والصدوع :
أ. الفواصل
ب. الصدوع :
1. تصنيف الصدوع
2. الأدلة على حدوث الحركة على امتداد الصدوع
3. العلاقة بين الطيات والصدوع
V. تفسير التاريخ الجيولوجى

توصل علماء القرنين الثامن عشر والتاسع عشر ، والذين أرسوا دعائم علم الجيولوجيا بمفهومه الحديث، إلى أن معظم الصخور الرسوبية قد ترسبت أصلا كطبقات أفقية لينة فوق قاع البحر ثم تصلدت مع الزمن . ولكن كان العلماء مندهشين من وجود كثير من الطبقات المائلة والمطوية أو المتصدعة ، كما كانوا مندهشين أيضا من القوى التى سببت تشوه هذه الصخور الصلدة بتلك الطريقة . فهل يمكن إعادة بناء التاريخ الجيولوجى فى منطقة ما من أنماط تشوه الصخور التى نشاهدها فى الحقل؟ وكيف تتشوه أنواع الصخور المختلفة ، وما العلاقة بين التشوه وتكتونية الألواح؟ ، حيث أثبتت المشاهدات الحقلية أن أنماط تشوه الصخور متشابهة فى جميع أنحاء الأرض .



شكل (1.10): مثال لتشوه الصخور rock deformation.
منكشف لصخور ترسبت كطبقات رسوبية أفقية من الحجر الجيرى والتشرت (مجموعة الحواسنة) ، ثم تعرضت للطى والتصدع نتيجة لقوى تكتونية أثرت على المنطقة . لاحظ وجود صدع (يسار الصورة) يفصل الصخور الرسوبية عن الصخور البركانية ، جبال عمان ، الإمارات العربية المتحدة . (د. على فراج عثمان ، قسم الجيولوجيا - جامعة عين شمس) .

وللإجابة عن التساؤلات السابقة ، فإن هناك بعض الأسس والمفاهيم التى تفسر طرق تشوه الصخور . ويعرف العلم الذى يهتم بدراسة تراكيب القشرة الأرضية وشكلها وتوزيعها ، والعوامل التى سببتها **بالجيولوجيا التركيبية structural geology** . وهذا الفرع من علوم الجيولوجيا قريب من علم **الجيولوجيا البنائية (البنائيات) tectonics** ، الذى يهتم بدراسة المعالم التركيبية الكبرى للجزء الخارجى من الأرض وأسبابها ؛ أى التراكيب الأكثر اتساعا وامتدادا من تلك التى يتعامل معها فرع الجيولوجيا التركيبية .

وتعتبر عمليات **الطى folding** **والتصدع faulting** من أكثر أشكال التشوه شيوعًا فى الصخور الرسوبية والمتحولة والنارية ، وهى الصخور المكوّنة للقشرة الأرضية ، ولكنها تكون أوضح ما يمكن فى الصخور الطبقية (سواءً كانت رسوبية أو بركانية) والصخور المتحولة عنها (شكل 1.10). وتشبه الصخور عندما تطوى قطعة قماش ، وعندما تضغط من طرفيها ، حيث تتحدب لأعلى على هيئة **طيات folds** . أما **الصدوع faults** فإنها تنشأ عن قوى تكتونية تؤدى إلى كسر الجسم الصخرى وانزلاق أحد جانبيه بالنسبة للآخر فى حركة موازية لسطح الكسر . وتتراوح أبعاد الطيات والصدوع بين عدة سنتيمترات وعشرات الكيلومترات . ويتكون عديد من سلاسل الجبال من سلاسل متصلة من الطيات الكبيرة أو الصدوع أو كليهما ، والتى تم تجويتها وتعريتها . ويعتقد الجيولوجيون الآن أن القوى التى تحرك ألواح القشرة الأرضية الكبيرة هى المسئولة أساسًا عن التشوهات الموجودة فى معظم المناطق ، حتى المحلية منها .

ا. كيف تتشوه الصخور؟

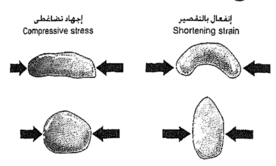
لكى نناقش تشوه الصخور ، فإنه من المفيد أن نستعرض بعض الخصائص الأولية للمواد الصلبة . وتأتى معرفتنا بالعوامل التى تتحكم فى تشوه الصخور من التجارب المعملية ، عندما نقوم بضغط أو لىّ أو شدّ أسطوانات أو مكعبات من الصخور تحت ظروف متحكم فيها، ومتابعة ما يحدث فى هذه الحالات .

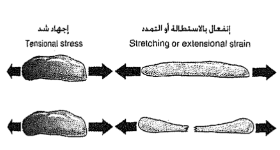
أ. الإجهاد والانفعال

يفضل الجيولوجيون استخدام مصطلح **إجهاد stress** بدلا من مصطلح ضغط pressure عند مناقشة تشوه الصخور. ويصف مصطلح **إجهاد حابس confining stress** الوضع عندما يكون الإجهاد متساويًا فى كل الاتجاهات ، مثل : الضغط على جسم صغير مغمور فى سائل أو غاز ، أو الضغط الذى يشعر به الشخص فوق كل جسمه عندما يغوص بعمق تحت سطح الماء . وعلى العكس من ذلك ، فإن الإجهاد التفاضلى differential stress والذى يكون غير متساوٍ فى كل الاتجاهات ، هو الذى يسبب تشوه الصخور. وللإجهاد التفاضلى ثلاثة أنواع ، هى: إجهاد الشد tensional stress وهو الذى يعمل على شد الصخور ، وبالتالى جذب مكونات الصخر بعيدا عن بعضها البعض (شكل 2.10أ) ، **وإجهاد تضاغطى compressive stress** (شكل2.10 ب) وهو إجهاد يدفع بمكوّنات الصخور نحو بعضها البعض ، بينما يعمل **إجهاد القص (البتر) shear stress** على دفع كل جانبين متقابلين من الجسم ليسا على خط واحد ولكنهما فى المستوى نفسه فى اتجاهين متعاكسين . ولتخيل إجهاد القص ، فإننا إذا أمسكنا بمجموعة من الأوراق مثل أوراق اللعب "الكوتشينة" بين راحتينا ، ثم حركنا أيدينا موازيتين لبعضهما البعض ، ولكن فى اتجاهين متعاكسين ، فإن الأوراق تنزلق فوق بعضها البعض ، مما يؤدى إلى تشوه الشكل (شكل3.10) .

وتتولد القوى نفسها فى الأنواع الثلاثة من الحدود بين الألواح ؛ فإجهادات التضاغط تسود عند الحدود

المتقاربة عندما تتصادم الألواح ، وتسود إجهادات الشد عند الحدود المتباعدة عندما تتحرك الألواح بعيدًا عن بعضها البعض ، وتسود إجهادات القص عند الصدوع الناقلة عند حدود الألواح عندما تنزلق الألواح أفقيا بمحاذاة بعضها البعض .





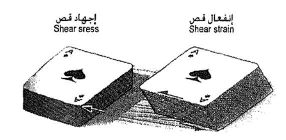
شكل (2.10): تأثير إجهادات الشد والتضاغط

أ) إجهاد الشد tensional stress يعمل على تمدد الجسم واستطالته في اتجاه موازٍ لاتجاه الشد أو الكسر إذا استمر الشد .

ب) يؤدى إجهاد التضاغط compressional stress إلى طي الكرة أو استطالتها في اتجاه عمودي على الضغط .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ويستخدم مصطلح انفعال لوصف تشوه الصخور نتيجة للإجهاد . ويمكن تعريف الانفعال strain بأنه تغيير في حجم أو شكل جسم صلب أو في كليهما معا نتيجة للإجهاد . ويسبب الإجهاد الحابس تغييرًا في حجم الجسم الصلب ، بينما يبقى الشكل ثابتًا. أما الإجهاد التفاضلي فإنه يؤدى إلى تغيير شكل الجسم الصلب ، وقد يسبب أو لا يسبب تغييرًا في الحجم.



شكل (3.10): إجهاد القص shear stress . عندما نحرك أوراق اللعب (الكوتشينة) في اتجاهين متعاكسين متوازيين ، تنزلق الأوراق فوق بعضها البعض .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ب. مراحل التشوه

عندما يتعرض صخر لإجهاد متزايد ، فإنه يمر بثلاث مراحل من التشوه على الترتيب كالتالى :

1. التشوه المرن

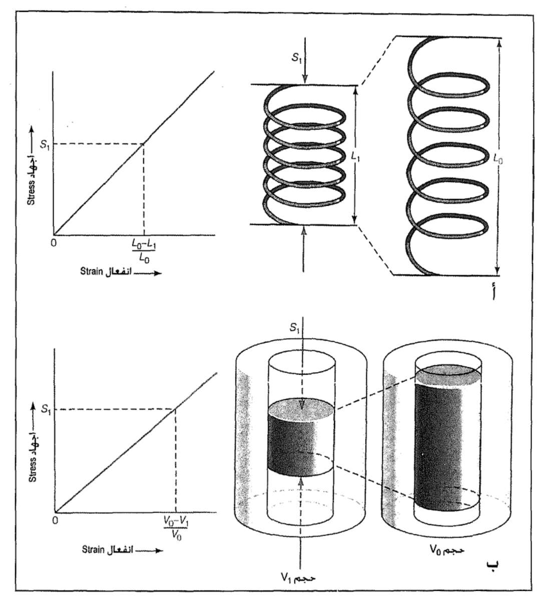
يعرف التشوه المرن **elastic deformation** بأنه تغيير معكوس أو غير دائم في حجم أو شكل الصخر الذى تعرض للإجهاد . وعندما يزول الإجهاد ، فإن الصخر يعود إلى حجمه وشكله الأصلى . ويمكن لمادة ما أن تتحمل أى جهد حتى حد معين ، يسمى حد المرونة **elastic limit** ، وهو الحد الأقصى للإجهاد الذى يتعرض بعده الجسم الصلب للتشوه الدائم ولا يعود إلى حجمه أو شكله الأصلى مرة ثانية عندما يزول الإجهاد .

وقد كان العالم البريطانى الشهير سير روبرت هوك Sir Robert Hooke (1635-1703م) أول من أوضح أن العلاقة بين الإجهاد والانفعال لكل المواد تكون دائمًا عبارة عن خط مستقيم ، بافتراض عدم تجاوز حد المرونة . ولقد أثبت هوك هذه العلاقة باستخدام زنبرك ، كما هو موضح في شكل (4.10أ) . وجدير بالذكر أن قانون هوك صحيح أيضا عند تطبيقه

على الصخور (شكل 4.10 ب) ، والذى يوضح أن الانفعال يتناسب طرديًا مع الإجهاد .

2. التشوه اللدن

يعرف التشوه اللدن **ductile deformation** بأنه تغير دائم فى الشكل أو فى الحجم أو فى كليهما فى صخر تعرض لإجهاد تعدى حد المرونة. فإذا تعرضت أسطوانة من صخر ما لإجهاد تضاغطى مواز للمحور الطولى للأسطوانة فسيتزايد منحنى الإجهاد/ الانفعال للأسطوانة بشكل مطرد أولاً فى منطقة المرونة (شكل 5.10) ، حتى يصل إلى الحد الأقصى للمرونة (نقطة Z) ، ثم بعد ذلك يصبح المنحنى مسطحا حيث يسبب المزيد من الإجهاد تشوها لدنا . فإذا أزيل



شكل (4.10): ينص قانون هوك على أن الانفعال يتناسب طرديا مع الإجهاد فى المواد المرنة.

أ) يقل طول الزنبرك نتيجة للإجهاد التضاغطى S_1 ، من L_0 إلى L_1 . وتمثّل العلاقة بين الإجهاد والانفعال بخط مستقيم.

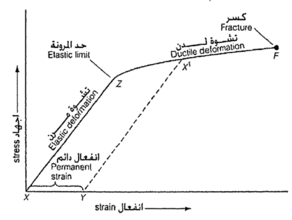
ب) يقل طول الاسطوانة الصخرية نتيجة لإجهاد تضاغطى S_1 ، ويقل حجم الأسطوانة من V_0 إلى V_1 ، وتمثّل العلاقة بين الإجهاد والانفعال بخط مستقيم .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الإجهاد عند نقطة X^1 ، فإن الأسطوانة تعود جزئياً إلى شكلها الأصلى ، ويتناقص الانفعال على امتداد المنحنى YX^1 ، ويحدث انفعال دائم للصخر يساوى XY. ويرجع الانفعال الدائم XY إلى التشوه اللدن للأسطوانة.

3. التكسر

يحدث التكسر **fracture** فى الجسم الصلب عندما يتجاوز الإجهاد حدود كل من التشوه المرن واللدن. فإذا أخذنا فى الاعتبار منحنى الإجهاد/ الانفعال مرة أخرى فى شكل (5.10) ، وإذا استمرت زيادة الإجهاد بدلا من إزالته عند نقطة X^1 ، فإن منحنى الإجهاد/ الانفعال سوف يستمر فى التزايد حتى نقطة F ، حيث تنكسر الأسطوانة. ومن الواضح أن التكسر هو نوع من التشوه الدائم غير المعكوس.

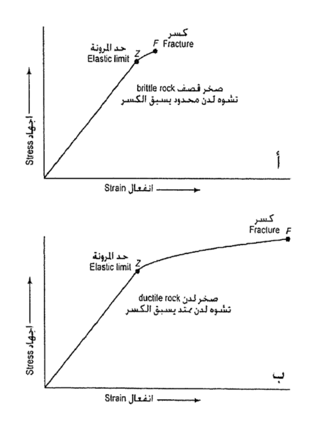


شكل (**5.10**): منحنى الإجهاد – الانفعال لأسطوانة صخرية تم إجراء التجربة عليها فى المعمل.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

جـ. المواد اللدنة والمواد القصفة (سريعة الكسر)

تصنف المواد عموما إلى قصفة ولدنة. وتميل المواد القصفة brittle substances (سريعة التكسر) إلى التشوه بتكوين كسور ، بينما تتشوه المواد اللدنة ductile substances بتغيير شكلها. فإذا أسقطنا قطعة من الزجاج على الأرض فإنها سوف تتكسر ، ولكن إذا أسقطنا قطعة من الزبد على الأرض فإنها سوف تتشوه دون أن تتكسر. فالزجاج إذاً مادة قصفة بينما الزبد مادة لدنة. ويوضح شكل (6.10 أ) منحنى إجهاد/ انفعال نموذجيًا لمادة قصفة. ويلاحظ أن النقطة Z التى هى حد المرونة تكون قريبة جدًا من النقطة F وهى نقطة التكسر point of fracture . لذلك ، فإنه يحدث تشوه لدن قليل جدًا فى المادة القصفة قبل التكسر. وعلى العكس ، فإن حد المرونة يكون بعيدًا عن نقطة التكسر فى المواد اللدنة (شكل 6.10 ب). ويوضح شكل (10. 1) أمثلة لتشوه صخور قصفة وأخرى لدنة. فالطبقات فى شكل (1.10) قد لويت بشدة وانحنت نتيجة التشوه اللدن ، كما أن بعض الطبقات قد تشوهت بالتكسر.



شكل (**6.10**): مقارنة منحنيات الإجهاد- الانفعال للمواد القصفة واللدنة.

أ) منحنى المواد القصفة ، ب) منحنى المواد اللدنة.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ولكى نفهم التشوه فى الصخور ، فمن الضرورى مناقشة العوامل الأساسية التى تتحكم فى الخصائص الميكانيكية للصخور ، وهى : الحرارة ، والإجهاد الحابس والزمن ، ومعدل الانفعال ، والتركيب . ونعرض فيما يلى وصفا لكل من هذه العوامل :

1. الحرارة

كلما ارتفعت درجة الحرارة ، أصبحت المادة الصلبة أكثر لدونة وأقل تقصفا. فمثلا يصعب ثنى قضيب من الزجاج عند درجة حرارة الغرفة ، وإذا حاولنا ثنيه بشدة ، فإنه ينكسر لأنه يتكون من مادة قصفة . ومع ذلك .. فإن هذا القضيب يصبح لدنا ويسهل ثنيه إذا سُخّن حتى درجة الاحمرار . وتشبه الصخور قضيب الزجاج ، حيث تنكسر عند سطح الأرض ، بينما تصبح لدنة فى الأعماق بسبب تدرج حرارة الأرض geothermal gradient ، وهو معدل الزيادة فى درجة حرارة الأرض مع العمق .

2. الإجهاد الحابس

الإجهاد (الضغط) الحابس confining stress هو ضغط منتظم يؤثر على الصخور من جميع الجهات نتيجة وزن كل الطبقات التى تعلو هذه الصخور (انظر شكل 2.8). ويعوق الإجهاد الحابس العالى تكوّن الكسور ، ولذلك فهو يقلل من صفات التقصف . فعند الإجهاد الحابس العالى يصبح من السهل على المادة الصلبة أن تتشوه دون أن تنكسر.

3. الزمن ومعدل الانفعال

يلعب الزمن دورًا مهمًّا فى تشوه الصخور ، إلا أنه لايسهل رصد هذا الدور بسهولة. فعند تعرض مادة صلبة للإجهاد ، فإن هذا الإجهاد ينتقل عبر كل الذرات المكوّنة للمادة الصلبة ، وعندما يزيد الإجهاد عن قوة الروابط بين الذرات ، فإن الذرات إما أن تنتقل إلى مكان آخر داخل البناء البلورى لكى تخفف من الإجهاد ، وإما تنكسر الروابط ، مما يعنى حدوث كسر. وحيث إن الذرات لا تستطيع الانتقال بسرعة فى المواد الصلبة ، فإذا كان الإجهاد بطيئًا وتدريجيًّا ، واستمر لفترة زمنية طويلة ، فإن الوقت يكون كافيًا لتحرك الذرات ؛ حيث تستطيع المادة الصلبة أن تغير من شكلها ويحدث ما يعرف بالتشوه اللدن .

4. التركيب

لتركيب الصخر تأثير كبير على خصائصه ، حيث تؤثر بعض أنواع المعادن بقوة على صفات الصخر . فبعض المعادن مثل الكوارتز والجارنت والأوليفين تكون شديدة التقصف ، بينما يكون البعض الآخر مثل: الميكا والصلصال والكالسيت والجبس لدنا . ومن جهة أخرى ، فإن الماء الموجود فى الصخر يقلل من صفات التقصف ، بينما يزيد من صفات اللدونة فى الصخر ، حيث يضعف الماء الروابط الكيميائية فى المعادن ، كما يكوّن الماء طبقة رقيقة جدا حول حبيبات المعدن ، تقلل من الاحتكاك بين الحبيبات . ولذلك تميل الصخور المشبعة بالماء لأن تتشوه تشوها لدنا أكثر من الصخور الجافة .

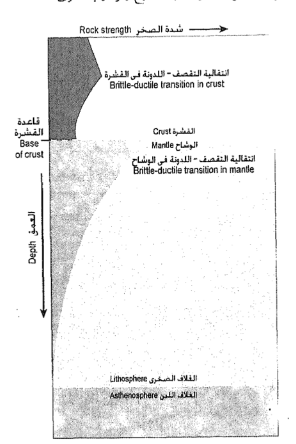
ومن الصخور التى تتشوه تشوها لدنا الحجر الجيرى والرخام والطفل والإردواز والفيليت والشست ، بينما تميل صخور الحجر الرملى والكوارتزيت والجرانيت والجرانوديوريت والنيس لأن تتشوه بالكسر غالبا .

د. صفات التقصف واللدونة فى الغلاف الصخرى

تعرف شدة الصخر rock strength بأنها أقصى إجهاد يتحمله الجسم الصلب ، دون أن يتمزق أو يتكسر. ويلاحظ تزايد شدة الصخر مع العمق باطراد حتى تصل إلى ذروتين (شكل 7.10) . ويرجع السبب فى ذلك ، إلى أن شدة الصخر تعتمد على تركيب الصخر ودرجة الحرارة والضغط .

وتتميز صخور القشرة الأرضية القارية بأنها غنية بمعدن الكوارتز، ولذلك تحدد شدة الكوارتز صفات الشدة فى صخور القشرة الأرضية . وتزداد شدة الصخر باطراد حتى عمق نحو 15 كم ، حيث تكون الصخور قوية فوق ذلك العمق ، وتتكسر وتتشوه بالتقصف . وتصبح الكسور أقل شيوعا تحت عمق 15 كم حيث يزيد الإجهاد الحابس ، وتصبح الصخور أكثر لدونة . ويعرف العمق الذى تبدأ عنده صفات اللدونة فى السيادة على صفات التكسر بانتقالية التقصف ـ اللدونة brittle-ductile transition .

وتتميز صخور الوشاح بغياب معدن الكوارتز ، بينما تكون غنية بمعدن الأوليفين. ومعدن الأوليفين أقوى من معدن الكوارتز، لذلك لا تصل انتقالية التقصف ـ اللدونة فى الصخر الغنى بالأوليفين إلا عند عمق نحو 40 كم . لذلك توجد ذروة ثانية لشدة الصخر عند هذا العمق (شكل 7.10) . وتقل شدة الصخر مرة أخرى تحت انتقالية التقصف — اللدونة فى الوشاح . وكما هو معروف .. فإن قوة الصخر تكون صغيرة جدا عند درجة حرارة نحو 1300 °م ، ولذلك يكون التشوه غير ممكن عن طريق التقصف. ويحدد اختفاء كل صفات التشوه بالتقصف ، الحد بين الغلاف الصخرى والغلاف اللدن (الأسثينوسفير).



شكل (7.10): رسم توضيحى لطريقة تغير شدة الصخر مع العمق ، حيث توجد ذروتا تقصف–لدونة فى القشرة والوشاح . والحد بين الغلاف الصخرى والغلاف اللدن (الأسثينوسفير) هو العمق الذى يختفى عنده التشوه .
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

II. تفسير نتائج الحقل

يحتاج الجيولوجيون إلى معلومات دقيقة عن وضع الطبقات التى يدرسون تشوه صخورها. والمنكشف outcrop هو المصدر الرئيسى لهذه المعلومات ، حيث لا تحجب التربة أو الحطام الصخرى regolith المكوّن من الكتل الصخرية المفككة صخر الأساس bed rock الذى يتواجد تحت سطح الأرض فى كل مكان (شكل 6.3) . ويوضح شكل (8.10) طبقات رسوبية تعرضت للطى . وفى أغلب الأحيان ، فإن الصخور المطوية تكون منكشفة جزئيًّا وتبدو كطبقات مائلة فقط. ويكون توجيه orientation الطبقة (بمعنى

تحديد اتجاهات الطبقة بدقة على الأرض بالنسبة لاتجاهات البوصلة) مفتاحا مهمًّا يمكن استخدامه لوضع تصور عن كل التركيب المشوه . وهناك قياسان فقط لوصف توجيه طبقة من الصخور منكشفة فى منطقة ما هما المضرب strike والميل dip . ونعرض فيما يلى وصفا لهما :

شكل (8.10): خريطة جيولوجية (أ) وقطاع عرضى مستمد منها (ب) . ويوضح ترتيب الطبقات أن الطبقة (1) عند القاع هى الأقدم، وأن الطبقات التى تعلوها على الجانبين هى الأحدث على التوالى . وتوضح الخطوط المتقطعة الجزء الذى تم تعريته من الطية ، بتوصيل الطبقات المتماثلة (التى تحمل نفس الرقم) وملاءمة الميل .

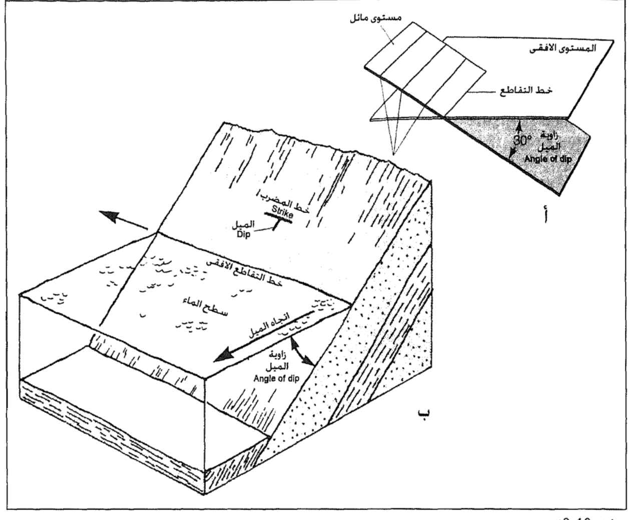
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

أ. قياس المضرب والميل

لكى نقيس اتجاه مستوى مائل ، فلابد من التعرف على المبدأين الهندسيين اللذين ينصان على أن : (1) تقاطع أى مستويين يكون عبارة عن خط ، و(2) الخط الناتج عن تقاطع مستوى مائل مع مستوى أفقى ، يكون أفقيا دائما (شكل 9.10 أ). وتكون كل الخطوط الأفقية موازية لبعضها البعض على المستوى المائل . ويمكن تخيل هذا الخط بأنه الخط الناتج عن تقاطع طبقة مائلة مع مستوى الماء فى بحيرة (شكل 9.10 ب)، حيث يكون سطح البحيرة أفقيا . ويعرف هذا التقاطع بالمضرب . ويمكن تعريف **خط المضرب strike** بأنه اتجاه يتحدد بالبوصلة كخط أفقى يتكون نتيجة تقاطع مستوى أفقى مع مستوى مائل . وبعد تحديد خط المضرب ، نحدد بدقة اتجاه ميل المستوى المائل . وتعرف زاوية الميل **angle of dip** بأنها الزاوية المحصورة بين مستوى أفقى ومستوى مائل . ويقاس اتجاه الميل direction of dip فى اتجاه عمودى على اتجاه المضرب (شكل 9.10 ب) . ويحتوى وصف الجيولوجى لمكشف الطبقة على المضرب والميل ، فيقول مثلا إنه "طبقة من الحجر الرملى خشن التحبب لها مضرب اتجاهه شمال – جنوب ، وتميل بزاوية قدرها 30° نحو الغرب" .

ب. عمل خريطة جيولوجية وقطاع عرضى

تعتبر الخريطة الجيولوجية وسيلة مريحة وسهلة لترتيب وتنظيم المعلومات الجيولوجية. حيث يسجل الجيولوجيون عليها مواقع المنكشفات ، وطبيعة وأنواع الصخور فى تلك المنكشفات وعمرها ومضارب وميول الطبقات المائلة . كما يساعد عمل قطاع عرضى جيولوجى فى منطقة ما على وضع تصور للتاريخ الجيولوجى فى تلك المنطقة . **والقطاع العرضى الجيولوجى geologic cross section** ، هو شكل يوضح المعالم التى يمكن رؤيتها إذا قطعنا مقطعا رأسيا فى جزء من القشرة الأرضية . ويمكن أحيانا رؤية قطاع عرضى طبيعى عند مشاهدة الواجهة الرأسية لجرف أو محجر ، أو عندما يتم قطع جزء من منطقة جبلية لمد طريق أو خندق. ويمكن أيضًا عمل القطاع العرضى



شكل (9.10):

أ. المبادئ الهندسية المستخدمة لقياس اتجاه وزاوية ميل مستوى مائل .

ب. خط المضرب والميل . يمكن تخيل خط المضرب strike بأنه الخط الناتج عن تقاطع الطبقة المائلة مع مستوى الماء فى البحيرة ، بينما يقاس اتجاه الميل dip فى اتجاه عمودى على اتجاه المضرب . وزاوية الميل هى الزاوية المحصورة بين مستوى أفقى ومستوى مائل مقاسة أسفل المستوى الأفقى .

من المعلومات الموضحة على الخريطة الجيولوجية. ويوضح شكل (8.10) خريطة جيولوجية مبسطة لمنطقة تظهر بها صخور رسوبية ، حيث طويت الصخور الرسوبية التى كانت أصلا أفقية ، بالإضافة إلى قطاع عرضى مستمد من الخريطة .

ويمكن ملاحظة أن الخريطة والقطاع العرضى فى شكل (8.10) يمثلان أجزاء من طية تم تعرية وإزالة أجزاء منها منذ زمن طويل . ويستطيع الجيولوجى إعادة بناء الأشكال المشوهة لطبقات الصخور ، إذا ما أزالت التعرية أجزاء من المتكوّنات الصخرية . ولابد أن يلاحظ الجيولوجى أولاً بعض المعالم مثل الطبقات الرسوبية ، والتى ترسبت أفقية عند قاع البحر ، فإذا وجدت هذه الطبقات مائلة الآن ، كما هو موضح فى الشكل ، فذلك يعنى أن أحداثًا لاحقة قد أدت إلى أن تميل الصخور وتنحنى . ويدلنا قانون تعاقب الطبقات (الطبقات الأحدث يتم ترسيبها فوق طبقات أقدم) على أى الطبقات هى الأقدم (طبقة

رقم 1) ، وأن الطبقات التى تعلوها على الجانبين هى الأحدث على التوالى . ويستطيع الجيولوجى باستخدام ميل الطبقات أن يقوم بعمل قطاع عرضى - وهو مقطع رأسى كما لو كان موجودا على امتداد الخط A-B على الخريطة . ونلاحظ أن الطبقات على كلا جانبىْ المتكون تكوّن متماثلة. وعند توصيل هذه الطبقات بخطوط متقطعة تتلاءم مع الميول الملحوظة ، فإنه يمكن إعادة بناء حدود أجزاء الطبقات التى تم إزالتها بالتعرية . ولكى نكمل القطاع العرضى ، فإننا نسقط امتداد الطبقات تحت سطح الأرض ، على الرغم من عدم رؤيتها .

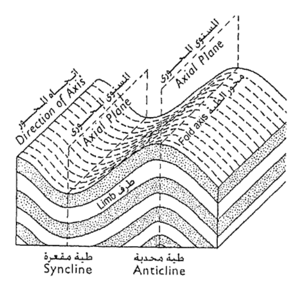
ويوضح شكل (8.10) أن محيطا قديما (غير موجود الآن بالطبع) ترسب على قاعه تتابع من الصخور الرسوبية ، ثم تعرضت هذه الصخور والتى كانت أصلا فى وضع أفقى لقوى تضاغطية فى القشرة سببت ثنيها فى طيات ورفعتها فوق سطح البحر . ولقد أزالت التعرية جزءا كبيرا من القطاع ، وتركت البقايا الموجودة اليوم والتى تم تمثيلها بالخريطة والقطاع العرضى .

III. التشوه بالثنى: طى الصخور

تمثل الطيات والكسور أدلة على تشوه الصخور . حيث يقوم الجيولوجيون بإعداد خرائط لها فى الحقل . وتؤدى دراسة مثل هذه التراكيب إلى الوصول إلى نظرة شاملة عن القوى التى نشأت من تكتونية الألواح . ويعنى مصطلح طية **fold** أن صخورًا كانت فى الأصل أفقية قد تعرضت للطى لاحقًا . وقد ينتج التشوه إما عن قوى أفقية أو رأسية فى الأرض ، مثلما ندفع قطعة من الورق فى اتجاهين متقابلين أو من أسفل إلى أعلى فيحدث الطى . والطى شكل شائع للتشوه يمكن ملاحظته فى كل أنواع الصخور وخاصة المتطبقة منها ، وهو يوجد بصورة نموذجية فى أحزمة الجبال . وتكون الطيات ضخمة فى سلاسل الجبال الحديثة والتى يتم تجويتها بالتعرية حيث يبلغ طول بعضها عدة كيلومترات . كما قد تكون بعض الطيات فى حدود عدة سنتيمترات . وقد تُطوى الطبقات بلطف أو بعنف ، تبعا لشدة القوى السائدة وقت التشوه والفترة الزمنية التى تعرضت فيها الصخور للتشوه وقابلية الطبقات لمقاومة التشوه .

أ. أنواع الطيات

إن أبسط أنواع الطيات ما يسمى **بالطية أحادية الميل monocline** حيث تميل بعض الطبقات الأفقية أو المائلة بزاوية صغيرة فى اتجاه واحد ، وبزاوية أكبر من زاوية الميل السائدة . ويمكن تخيل الطية أحادية الميل بسهولة ، إذا وضعنا كتابا على منضدة ثم وضعنا منديلا فوق أحد جوانب هذا الكتاب بحيث يتدلى بقية المنديل على المنضدة ، فإن ثنية المنديل تعطى الكتاب شكل طية أحادية الميل . إلا أن معظم الطيات تكون أكثر تعقيدا من هذا النموذج . فالطى إلى أعلى على هيئة قوس يسمى **تحدبا (طية محدبة) anticline** ، بينما يسمى الطى لأسفل على هيئة زورق **تقعرا (طية مقعرة) syncline** (شكل 10.10). وعادة ما تتلازم



شكل (**10.10**): طيات متماثلة توضح معنى المستوى المحورى والمحور. لاحظ أن السطح العلوى لايمثل سطح الأرض ، ولكنه يمثل سطح طبقة معينة فى التتابع .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

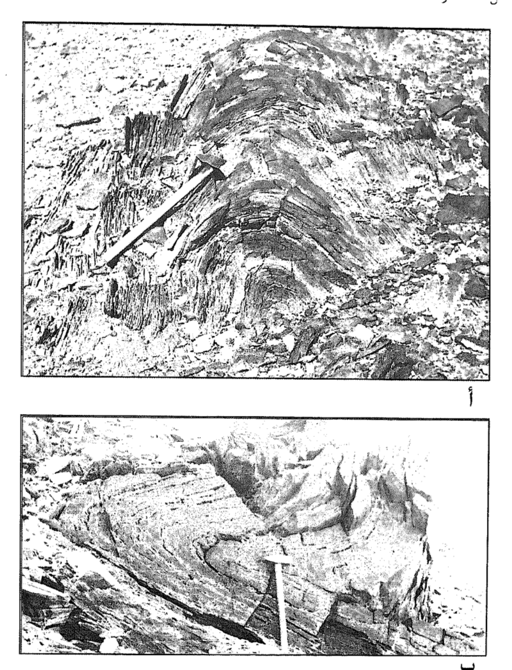
التحدبات والتقعرات . وتسمى الطبقات المكوّنة

لجانبي الطية بالطرفين limbs ، بينما يطلق على المستوى التخيلي الذي يقسم الطيـة إلى نصـفين متماثلـين تقريبـا بالمستوى المحـوري axial plane. ويسـمى الخـط النـاتج عـن تقـاطع المسـتوى المحـوري مـع الطبقـات بمحور الطية fold axis (شكل 10.10).

وقد تكون الطيـات متماثلـة symmetrical folds كتلك الموضحة فى شكل (10.10)، وهـى الـتى يميـل جناحاها بلطف وبدرجـة متسـاوية عن المحور ، كـما قـد تكون غير متماثلة ؛ نتيجة الإجهاد الشديد الذى يسـبب بعض التعقيدات فى الشكل . ويوضح شكل (11.10) بعض الأشكال الشائعة للطيات ، بينما يوضـح شـكل (12.10) أمثلـة لـبعض الطيـات فى صخــور القاعـدة بالصحراء الشرقية بمصر .

شكل (11.10): خمسة أنواع مختلفة من الطيات .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

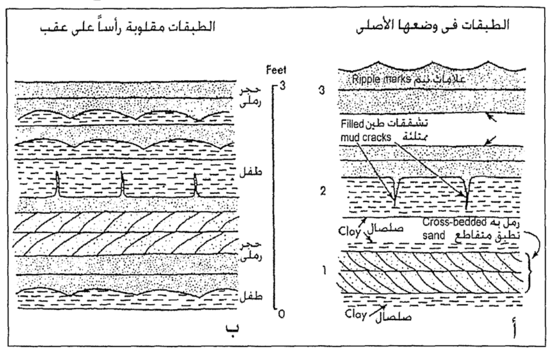


أ

ب

شكل (**12.10**): أمثلة لبعض الطيات فى صخور القاعدة بالصحراء الشرقية – مصر .
أ) طية مفتوحة **open fold** فى صخور النيس ، منطقة حفافيت – الصحراء الشرقية – مصر .
ب) طية مضطجعة **recumbent fold** فى متكوّن الحديد الشريطى ، جبل الحديد – الصحراء الشرقية – مصر (أ.د. محمود فوزى الرملى ، هيئة المساحة الجيولوجية).

وقـد تكـون الطيـة مفتوحـة open fold (شـكل 12.10 أ) إذا كانت الزاوية بين جناحيها أكثر من °90. وكلما زادت شـدة الإجهـاد التـضاغطى ، كـان جناحـا الطية أكثر ميلا . وعندما يكون الإجهاد شديدا ، تكون الطية أكثر إحكاما ويصبح جناحاها مـوازيين لبعـضهما البعض ، وتوصف هـذه الطيـة بأنهـا طيـة متفقـة الميـل



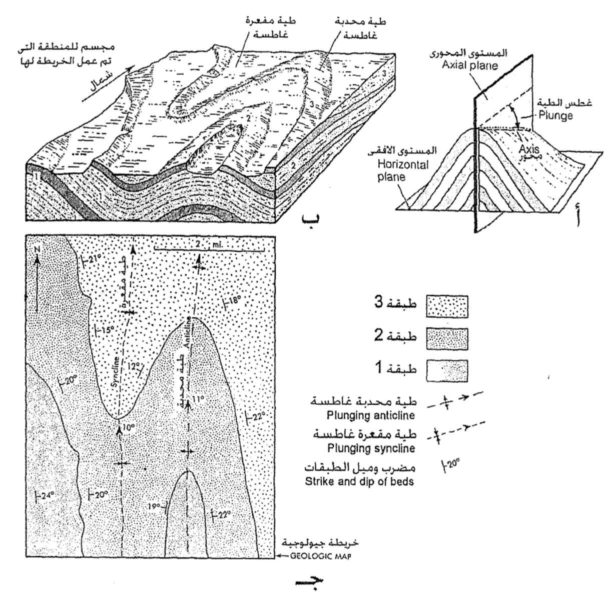
شكل (**13.10**): استخدام علامات النيم **ripple marks** وتشققات الطين **mud cracks** والتطبق المتقاطع **cross-bedding** فى تحديد الوضع الأصلى للطبقات الرسوبية .

أ) الطبقات فى مكانها ووضعها الأصلى كما كانت أثناء تكوّنها ، حيث تكون التراكيب الرسوبية فى وضعها العادى .

ب) الطبقات نفسها ، والتى كانت أصلا فى وضع أفقى ثم قلبت رأسا على عقب .

isoclinal fold (شكل 11.10 ب) . ويسبب الإجهاد الشديد أيضًا إما أن تصبح الطية غير متماثلة **asymmetrical** ، حيث يميل جناحاها بدرجات ميل مختلفة (شكل 11.10 ج) ، وإما تكون مقلوبة **overturned fold** ، حيث يميل جناحاها فى الاتجاه نفسه (شكل 11.10 د) . وفى النهاية ، فإن الطية المقلوبة overturned fold يمكن أن تصبح طية مضطجعة **recumbent fold** حيث يكون جناحاها فى وضع أفقى أو قريب من ذلك (شكل 11.10هـ و12.10ب) . ويكثر وجود الطية المضطجعة فى مناطق التصادمات القارية ، مثل جبال الألب والهيمالايا . وفى حالة الطيات المقلوبة والطيات المضطجعة ، فإنه من الضرورى معرفة الوضع الصحيح للطبقات ، وأى الطبقات هى المقلوبة. علما بأن هذا ليس ميسورا دائما ، وخصوصا إذا أزيلت أجزاء من الطيات بالتعرية . وتساعد أحيانا التراكيب الرسوبية ، مثل : الشقوق الطينية والطبقات المتدرجة graded layers فى تحديد الوضع الأصلى للطبقات (شكل 13.10).

ويوضح شكل (10.10) طية ذات محور أفقى . أما إذا كان محور الطية مائلا على المستوى الأفقى ، فتسمى الطية غاطسة **plunging fold** (شكل 14.10 وشكل 15.10). وتسمى الزاوية بين محور الطية والأفقى بغطس الطية **plunge** . وقد يميل محور الطية فى اتجاهين، وتعرف الطية حينئذٍ بالطية مزدوجة الغطس double plunging fold .



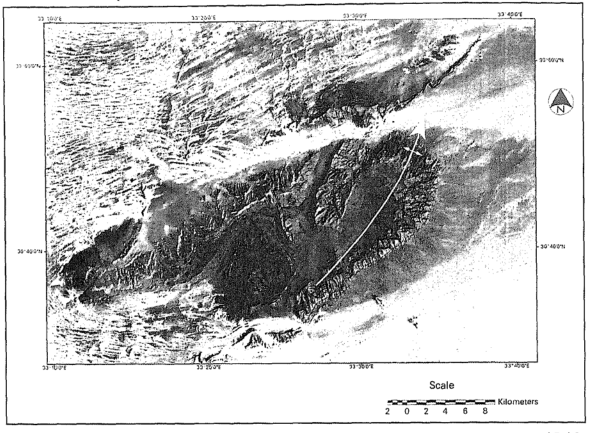
شكل (14.10): التحدبات والتقعرات الغاطسة

أ . غطس طية محدبة

ب . التحدبات والتقعرات كما تظهر فى شكل مجسم . ويوضح المجسم الأشكال الطوبوغرافية المميزة الناتجة عن تعرية أنواع مختلفة من الصخور مما يدل على وجود طيات غاطسة . لاحظ أن الطبقات المقاومة للتعرية (الطبقتان 2 و 3) تكوّن مرتفعات عالية فى كل من الطيات المحدبة والغاطسة ، بينما تكون الطبقات السهلة التعرية (طبقة 1) منخفضة طوبوغرافيا فى كل من التحدبات والتقعرات الغاطسة.

جـ . خريطة جيولوجية للمنطقة .

ويلاحظ تلاشى محور الطية المحدبة عند تتبعه فى الحقل . وتبدو الطية أنها تغطس فى الأرض عندما تختفى ، كما يحدث لتجعدات قطعة قماش فوق المنضدة . ويشبه نمط الطبقات المنكشفة فى الطبقات الغاطسة (شكل 14.10 ب و جـ) فوق سطح الأرض الذى تم تسويته بالتعرية حرف V أو شكل حدوة الحصان بدلا من نمط الشرائط المتوازية تقريبا للطبقات فى الطيات غير الغاطسة (شكل 8.10) . ومع ذلك فإنه

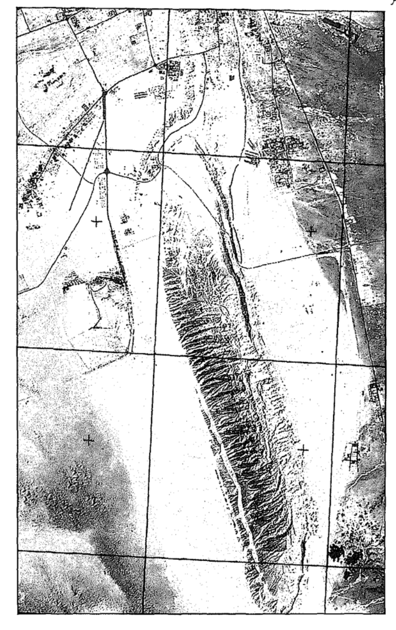


شكل (15.10): صورة فضائية لمنطقة جبل المغارة بشمال سيناء – مصر ، توضح طية محدبة غاطسة . (لاحظ وجود قبة فى الجزء الجنوبى الغربى من طية المغارة) .

يمكن التمييز بين الطيات المحدبة الغاطسة والطيات المقعرة الغاطسة بالطريقة نفسها التى نستخدمها فى حالة الطيات غير الغاطسة ؛ أى باستخدام الميل والأعمار النسبية للطبقات . ويوضح شكل (16.10) طية مزدوجة الغطس بجبل حافيت بالعين بدولة الإمارات العربية المتحدة .

والقبة **dome** نوع من الطيات المحدبة لها مقطع دائرى أو إهليليجى تميل فيها الطبقات بقدر متساوٍ من نقطة معينة مركزية إلى الخارج فى جميع الاتجاهات (شكل 17.10 أ) . أما الحوض **basin** فهو طية مقعرة تشبه الطبق ، يكون ميل الطبقات فيه من كل الجوانب نحو نقطة مركزية (شكل 17.10 ب) ، وقد يبلغ قطر القبة أوالحوض عدة كيلومترات . ويمكن تعرف القباب والأحواض فى الحقل من الشكل الدائرى أو البيضاوى المميز لها . والقباب ذات أهمية خاصة فى جيولوجيا النفط ، نظرا لأن النفط والغاز يهاجران إلى أعلى القبة خلال الصخور المنفذة . فإذا كانت الصخور عند أعلى نقطة فى القبة صعبة الاختراق ولا يسهل تسرب المواد البترولية منها ، فإن النفط أو الغاز أوكليهما يتجمع داخل القبة . وينبغى تأكيد أن توافر الشروط التركيبية والصفات الصخرية المناسبة والتى تصلح كمستودع لا يعنى حتمًا وجود النفط أو الغاز أو كليهما .

ويعزى تكوّن بعض القباب إلى الصخور النارية التى تتداخل فى القشرة لتدفع الرسوبيات التى تعلوها إلى أعلى . وتتكون بعض الأحواض عندما يبرد جزء ساخن من القشرة الأرضية وينكمش ؛ مما يؤدى إلى هبوط الرسوبيات التى تعلوها . ويتكون البعض الآخر



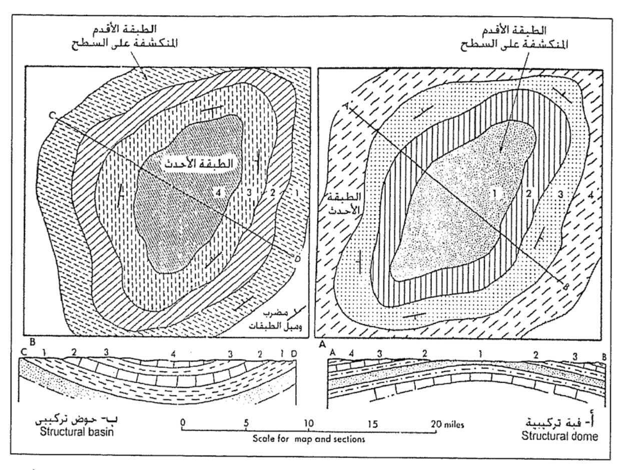
شكل (16.10): صورة فضائية توضح طية مزدوجة الغطس double plunging fold فى منطقة جبل حافيت بالعين – الإمارات العربية المتحدة .

عندما تسبب بعض القوى التكتونية استطالة ومط القشرة الأرضية ، كما يؤدى وزن الصخور الرسوبية المترسبة فى بحر ضحل إلى تقعر القشرة الأرضية .

ب. الاستنتاجات من طى الصخور

من الصعب تعرف بعض الطيات بسبب تأثير عوامل التعرية . بينما يمكن فى بعض الحالات التعرف على التحدب الذى تم تعريته من وجود طبقات أقدم فى لب الطية يحيط بها من الجانبين صخور أحدث عمرا تميل إلى الخارج (قديث) شكل (8.10). أما التقعر الذى تم تعريته ، فتكون الطبقات الأحدث عمرا فى لب الطية المتقعرة تحيط به من الجانبين صخور أقدم عمرا (حديم) ، وتميل إلى الداخل (شكل 11.10) .

ويؤدى الاختلاف فى درجة تعرية الطبقات المطوية إلى تكوّن أشكال طوبوغرافية مميزة تدل على وجود



شكل (17.10): نشأة قبة وحوض تركيبيان. حيث يتبع نشأة التراكيب تعرية تؤدى إلى تكون أسطح مستوية تقريبا ؛ مما يؤدى إلى تكوّن أنماط متشابهة على الخريطة الجيولوجية .

أ) قبة dome . لاحظ أن أقدم الطبقات المنكشفة تكون فى المركز ، وأن الطبقات فى المقطع العرضى تشبه طية محدبة .

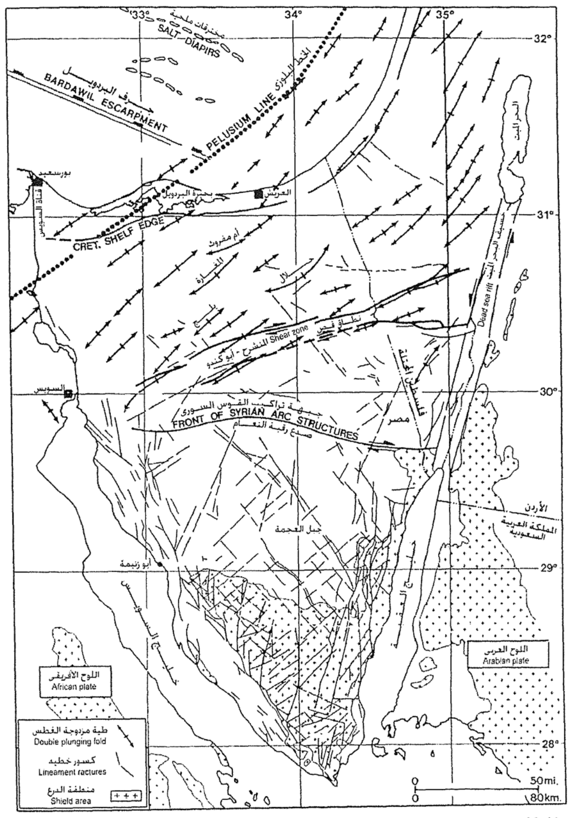
ب) حوض basin . لاحظ أن أحدث الطبقات المنكشفة تكون فى المركز ، وأن الطبقات فى المقطع العرضى تشبه طية مقعرة .

الطيات ؛ فقد يتكون وادى فى وسط طية مقعرة أو حيد مرتفع عند قمة طية محدبة . ومع ذلك ، فإنه من المهم معرفة أنه ليس من الضرورى أن تكون كل التحدبات أعرافا ridges أو تلالا ، أو أن تكون كل التقعرات وديانا .

وتوجد الطيات فى مجموعات مستطيلة عادة . وتسمى المنطقة الطولية التى تعرضت للطى وغيره من مظاهر التشوه **بحزام طى fold belt** . ويستدل من أحزمة الطى على أن صخور المنطقة قد ضغطت فى وقت واحد بقوى تكتونية أفقية ، قد تكون نشأت من تصادم الألواح ، مثل نظام القوس السورى Syrian arc system (شكل 18.10) ، والذى يضم مجموعة من الطيات المستطيلة فى شمال سيناء بمصر ، وفى فلسطين وسوريا ، وتأخذ اتجاه شمال شرق – جنوب غرب .

IV. التشوه بالكسر : الفواصل والصدوع

تميل صخور القشرة الأرضية ، خاصة تلك القريبة من السطح ، لأن تكون قصفة . ونتيجة لذلك ، فإن



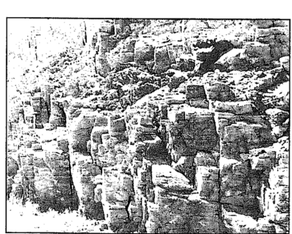
شكل (18.10): خريطة تكتونية تبين القوس السورى فى شمال سيناء بمصر وفلسطين، الذى يضم مجموعة من الطيات والقباب المستطيلة التى تأخذ اتجاه شمال شرق – جنوب غرب .

(After Jankins, D., 1990, North and Central Sinai, In: The Geology of Egypt, ed. R. Said, Balkema, Rotterdam).

الصخور عند سطح الأرض أو بالقرب منها تقطع بعدد لا نهائى من الكسور ، تسمى فواصل أو صدوعًا. والفاصل **joint** هو نوع من الكسور لم تحدث أية حركة على امتداده . أما الصدع **fault** فهو كسر حدثت حركة نسبية للصخور على جانبيه موازية لسطح الكسر .

أ. الفواصل

تنتشر الفواصل فى كل المنكشفات تقريبا ، والتى تتكون نتيجة تأثير القوى التكتونية . وتنكسر الصخور بسهولة أكثر عندما تتعرض للشد أو الضغط ، مثل أية مادة قصفة أخرى ، عند نقاط الضعف . وقد تكون نقاط الضعف عبارة عن شروخ دقيقة أو كسرات من مواد أخرى أو حتى أحافير. وتؤثر القوى الإقليمية التى تضم قوى التضاعف والشد والقص على الصخور، وعندما تتلاشى تلك القوى بعد ذلك فإنها تترك أثرها فى الصخور فى صورة مجموعة من الفواصل (شكل 19.10). وقد تتكون الفواصل أيضا بسبب غير تكتونى ، نتيجة تمدد وانكماش الصخور عندما تزيل التعرية طبقات من فوق السطح . وتسبب إزالة هذه الطبقات تقليل الضغط الحابس على الصخور تحتها، مما يسمح للصخور لأن تتمدد وأن تتجزأ عند نقاط الضعف .



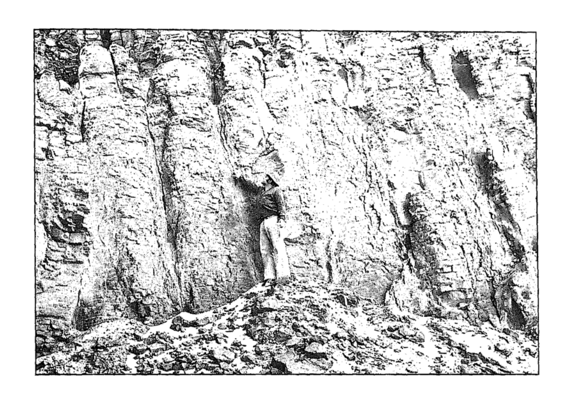
شكل (**19.10**): مجموعات فواصل **joint sets** تتقاطع وتكوّن نظام فواصل **joint system** فى صخور الشست بوادى أم لصيفة - الصحراء الشرقية - مصر .

وقد تتكون الفواصل فى اللابة نتيجة انكماشها أثناء تبردها وانخفاض درجة حرارتها. ومن أمثلة ذلك الفواصل العمدانية **columnar joints** والتى توجد فى البازلت (شكل 20.10) ، وتؤدى إلى تقسيم الصخر إلى أعمدة أو منشورات طولية . وليس من الضرورى تكوين فواصل عمدانية فى البازلت ، فهناك طفوح بازلتية تقطعها فواصل عادية .

ومعظم الفواصل تكون لها أسطح مستوية تقريبا . ولابد من تحديد اتجاه المضرب ومقدار الميل واتجاهه عند وصف الفاصل . ولا توجد الفواصل وحيدة أبدا، بل توجد فى مجموعات تتكون من أعداد كبيرة . وتعرف مجموعة الفواصل التى تكون أسطحها متوازية تقريبا " بمجموعة فواصل **joint set** ". أما نظام الفواصل **joint system** فيشمل مجموعتين أو أكثر من مجموعات الفواصل المتقاطعة ، والتى قد تكون من العمر نفسه أو ذات أعمار مختلفة (شكل 19.10) .

وتكون هذه الفواصل عادة بداية لمجموعة من التغيرات التى تؤثر بدرجة ملحوظة فى الصخور . فالفواصل مثلا ، تعمل كقنوات يصل من خلالها الماء والهواء إلى عمق الصخور ؛ مما يؤدى إلى زيادة سرعة التجوية وضعف التركيب الداخلى . وإذا تقاطعت مجموعتان أو أكثر من الفواصل ، فقد تسبب التجوية تكسر الصخور إلى كتل أو أعمدة كبيرة.

وترجع أهمية تحديد نظم الفواصل إلى أن الجيولوجيين قد يجدون أحيانا رواسب خامات ذات قيمة اقتصادية عند فحص أنظمة الفواصل . فقد تهاجر محاليل مائية ساخنة حاملة للذهب إلى أعلى خلال نظام من الفواصل ، حيث يترسب معدنا الكوارتز والذهب فى الشقوق . كما قد تكون المعلومات الدقيقة عن الفواصل مهمة أيضا عند تخطيط وإنشاء المشروعات الهندسية الكبيرة ، خاصة السدود والخزانات . فقد



شكل (20.10): الفواصل العمدانية columnar joints في صخور البازلت، بالواحات البحرية – الصحراء الغربية – مصر. (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن، هيئة المواد النووية).

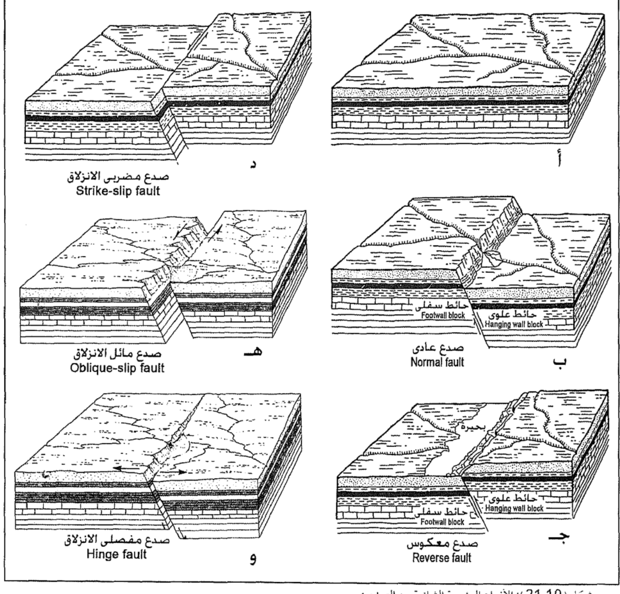
يكون صخر الأساس عند الموقع المقترح به عديد من الفواصل؛ مما قد يؤدى إلى انهيار الخزان أو تسرب الماء منه، ويكون إنشاء الخزان من الخطورة بمكان.

ب. الصدوع

بينما تشير الطيات عادة إلى أن القوى التضاغطية كانت سبب تكوينها، فإن الصدوع تتكون نتيجة لأنواع القوى الثلاث: التضاغطيه compressive والشد tension والقص shear. وتكون هذه القوى شديدة، خاصة عند حدود الألواح. وعموما، فإن الصدوع من المعالم الشائعة فى أحزمة الجبال، والتى تكون مصاحبة لتصادم الألواح، كما تشيع الصدوع أيضا فى وديان الخسف، حيث تنفصل الألواح وتشد نتيجة تحركها فى اتجاهات متضادة. وتظهر بعض الصدوع الناقلة مثل صدع سان أندرياس فى كاليفورنيا، والذى يبلغ طوله نحو 1000 كم إزاحة أفقية، قد تصل إلى مئات الكيلو مترات نتيجة انزلاق اللوحين أفقيا بالنسبة لبعضهما البعض. وقد تكون القوى فى القشرة الأرضية داخل الألواح قوية أيضا؛ مما يسبب تكوّن صدوع بعيدًا عن حدود الألواح.

- **الإزاحة النسبية**

إن معرفة مقدار الحركة التى حدثت على امتداد الصدع، وكذلك الجانب من الصدع الذى تحرك، تكون غير ممكنة عموما. وقد يمكن فى حالة مثالية قياس مقدار الحركة أو الإزاحة إذا وجدنا مثلا حصاة واحدة من الكونجلومرات قد تم قطعها بواسطة الصدع، وأن النصفين تحركا لمسافة يمكن قياسها. وحتى فى هذه الحالة، فإنه من غير الممكن تحديد أى



شكل (21.10): الأنواع الرئيسية الشائعة من الصدوع

أ) كتلة غير متصدعة (مكسورة فقط) .

ب) صدع عادى normal fault ، حيث يتحرك الحائط العلوى إلى أسفل بالنسبة للحائط السفلى .

جـ) صدع معكوس reverse fault ، حيث يتحرك الحائط العلوى إلى أعلى بالنسبة للحائط السفلى .

د) صدع مضربى الانزلاق strike-slip fault ، حيث تكون الحركة الأساسية أفقية وموازية لمضرب الصدع ، والصدع الموضح صدع يسارى الانزلاق .

هـ) صدع مائل الانزلاق oblique-slip fault ، حيث تكون الحركة أفقية على امتداد المضرب ورأسية لأعلى أو لأسفل فى الوقت نفسه .

و) صدع مفصلى hinge fault ، حيث تكون حركة أحد الجانبين دورانية على محور متعامد على مستوى الصدع .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

كتلة بقيت وأى كتلة تحركت ، أو أن كلا الكتلتين قد تحركتا . وعند تصنيف حركات الصدع، فإنه يمكن تحديد الإزاحة النسبية relative displacement فقط ، بمعنى أن جانبا واحدا من الصدع قد تحرك فى اتجاه معين بالنسبة إلى الجانب الآخر . ففى شكل (21.10ب) يظهر أن هناك إزاحة على جانبى الصدع ،

ويمكن فقط معرفة أن الجانب الأيمن قد تحرك لأسفل بالنسبة للجانب الأيسر. ولذلك تمثل الحركة النسبية على القطاع العرضى بسهمين ؛ لأننا لانستطيع عموما تحديد أى الكتلتين تحركت فعليا .

• الحائط العلوى والحائط السفلى

معظم الصدوع تكون مائلة ، بمعنى أن لها ميلا dip. ويستخدم المصطلحان السابقان الميل والمضرب لوصف توجيه الصدوع . ولوصف الميل فى الصدوع تسمى كتلة الصخر أعلى سطح الصدع المائل **بالحائط العلوى hanging wall block** ، بينما تسمى كتلة الصخر أسفل سطح الصدع المائل **بالحائط السفلى footwall block**. ولا تستخدم هذه المصطلحات بالطبع فى حالة الصدوع الرأسية ، حيث إن الكتلتين اللتين يفصلهما الصدع الرأسى تقعان على جانبيه .

1. تصنيف الصدوع

تصنف الصدوع بناءً على ميل الصدع واتجاه الحركة النسبية على جانبيه . ويسمى تقاطع سطح الصدع مع المستوى الأفقى مضرب الصدع fault strike ، وميل الصدع fault dip هو الزاوية التى يصنعها سطح الصدع المائل مع المستوى الأفقى ، وتقاس أسفل المستوى الأفقى . ويسمى تقاطع الصدع مع سطح الأرض بأثر الصدع fault trace . ويوضح شكل (21.10) الأنواع الشائعة من الصدوع ، مع التغيرات التى قد تحدثها محليا فى طوبوغرافية المنطقة المتأثرة بها . ويعتبر المستويان الرأسى والأفقى هما المستويان القياسيان اللذان يُرجع إليهما عند تصنيف الصدوع . وقد تكون الحركة فى الصدوع رأسية تماما أو أفقية تماما، كما قد تكون خليطا من كليهما .

• الصدوع العادية

تحدث الصدوع العادية نتيجة إجهادات شد تعمل على جذب القشرة وفصلها . كما تنشأ هذه الصدوع أيضا نتيجة الإجهادات التى تنشأ عن الدفع من أسفل ، والتى تعمل على شد القشرة الأرضية . والصدع **العادى normal fault** هو الصدع الذى يتحرك فيه الحائط العلوى إلى أسفل بالنسبة للحائط السفلى (شكل 21.10 ب) .

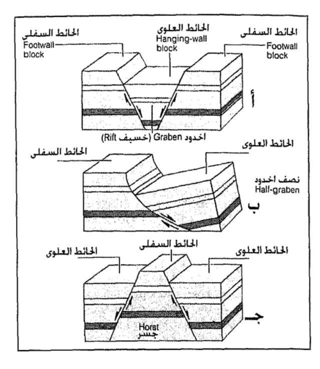
ومن الشائع وجود صدعين عاديين أو أكثر مضاربها متوازية ، ولكن تكون ميولها متضادة وتضم كتلة من القشرة الأرضية يزيد طولها عن عرضها وتحركت إلى أعلى أو إلى أسفل . وعندما تخسف كتلة صخور بين صدعين عاديين وهبوطها بالنسبة لما يحيط بها من كتل صخرية ، فإن ذلك يعرف **بخسيف rift valley** أو **أخدود graben** (شكل 22.10 أ). وإذا حدث الهبوط على امتداد صدع واحد فقط ، فإنه يتكون **نصف أخدود half graben** (شكل 22.10 ب). وقد ترتفع الكتلة الطولية بين الصدعين العاديين بالنسبة لما حولها ارتفاعا نسبيا لتكون **جسرا (نتقا) horst** (شكل 22.10 ج). وتجدر الإشارة إلى أن الوادى ذى الحوائط حادة الانحدار ، والذى يوجد عند منتصف حيود وسط المحيط الأطلنطى ويستمر فى جزيرة أيسلندة هو وادى خسف . ومن أشهر الأمثلة أيضا وادى الخسف الإفريقى African Rift Valley ، والذى يمتد عبر دول شرق إفريقيا لمسافة تزيد على 6000 كم فى اتجاه شمال – جنوب ، حيث صعدت الصهارة خلال أجزاء من وادى الخسف ، وعلى امتداد سطوح الصدوع ، لتكوّن براكين . ومن الأمثلة الشهيرة أيضا وديان الخسف التى يشغلها البحر الأحمر وخليج السويس (شكل 23.10) ، وكذلك خسيف وادى الراين فى غرب أوروبا.

• الصدوع المعكوسة وصدوع الدسر

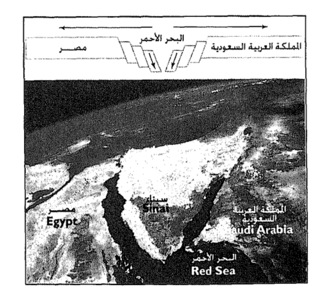
تنتج الصدوع المعكوسة **reverse faults** من الإجهادات التضاغطية ، حيث يتحرك الحائط العلوى نسبيا إلى أعلى بالنسبة للحائط السفلى شكل (21.10 ج). وتؤدى حركة الصدع المعكوس إلى تقصير القشرة الأرضية وزيادة سمكها . وهناك نوع خاص من الصدوع المعكوسة يسمى صدع الدسر **thrust faults** وهو صدع معكوس يميل مستواه بزاوية صغيرة تقل عن 45° غالبا فى معظم امتداده . ومثل هذه الصدوع تكون شائعة فى سلاسل الجبال المشوهة بشدة ؛ حيث تنتج صدوع الدسر نتيجة قوى تضاغطية كبيرة فى القشرة الأرضية ؛ مما يؤدى إلى اندفاع الحائط العلوى أفقيا لعدة كيلومترات فوق الحائط السفلى ، وتقصير القشرة الأرضية. ومن أمثلة صدوع الدسر فى الصحراء الشرقية المصرية صدع وادى حفافيت (شكل 24.10).

• الصدوع مضربية الانزلاق

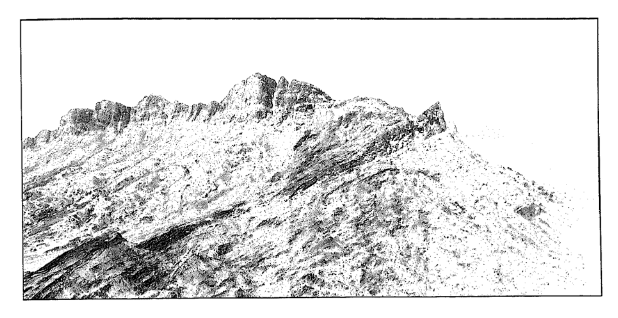
الصدع مضربى الانزلاق **strike – slip fault** هو صدع تكون الحركة الأساسية فيه أفقية ، ولذلك فإنها تكون موازية لمضرب الصدع (شكل 21.10 د) . وتتكون الصدوع مضربية الانزلاق نتيجة إجهادات القص أو الانزلاق . ومن أشهر أمثلة هذه الصدوع : صدع سان أندرياس فى كاليفورنيا، وصدع البحر الميت فى المنطقة العربية . ويحدد اتجاه حركة الصدع الأفقية بالنظر إلى طول صدع مضربى الانزلاق ، فإذا وجدنا أن الحركة النسبية قد أدت إلى أن تكون الكتلة التى على اليسار وكأنها قد تحركت فى اتجاه الرائى ، أو أن الكتلة التى على يمينه قد تحركت بعيدا عنه ، فإن الصدع يكون صدعًا مضربى الانزلاق يساريا left lateral strike – slip fault أو صدعًا يساريا sinistral fault . أما إذا وجدنا أن الحركة سببت تحرك الكتلة التى على يمينه نحوه والكتلة التى على يساره بعيدا عنه،



شكل (22.10): الجسور horsts والأخاديد grabens التى تنشأ عندما تؤدى إجهادات الشد إلى تكوّن صدوع عادية .
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



شكل (23.10): يتباعد اللوح الإفريقى الذى تتواجد فوقه مصر عن اللوح العربى الذى تتواجد فوقه المملكة العربية السعودية ، حيث أدت قوى الشد إلى نشأة وادى خسف rift valley امتلأ بالبحر الأحمر.
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).



شكل (**24.10**): صدع دسر **thrust fault** فى صخور النيس ، منطقة حفافيت – الصحراء الشرقية – مصر (مجموعة أ.د. محمود فوزى الرملى).

فيكون هذا صدعًا مضربى الانزلاق يمينيا right lateral strike –slip fault ، أو صدعا يمينيا dextral fault (شكل 25.10) . ويعتبر صدع سان اندرياس صدعًا مضربى الانزلاق يمينيا . وتقدر الحركة التى حدثت على امتداده بنحو 600 كم أو أكثر منذ 65 مليون سنة على الأقل.

شكل (**25.10**): شكل يوضح صدعًا مضربى الانزلاق يمينيا .
Right – lateral strike – slip fault.

ويعتبر نطاق صدع البحر الميت فى منطقتنا العربية والذى يقع فى نصف الكرة الشرقى هو المقابل لصدع سان أندرياس فى نصف الكرة الغربى . ونلاحظ أن هناك أربع مناطق تراكبت فيها الصدوع المزاحة أفقيا فى نطاق صدع البحر الميت (شكل 26.10) . وقد تسببت الحركة على جانبى تلك الصدوع فى نشأة أربعة أحواض ملئت بالمياه فيها بعد ، منها البحر الميت وبحر الجليل . وقد نشأ نطاق البحر الميت منذ بداية فتح البحر الأحمر ، حيث تحركت القشرة الأرضية أفقيا على جانبى هذا الصدع الناقل لمسافة تقدر بنحو 105 كم.

ومعظم الصدوع الكبيرة والنشطة هى صدوع مضربيه الانزلاق . والسبب فى ذلك أن الصدوع مضربيه الانزلاق ومراكز الانتشار ونطاقات الاندساس هى الأنواع الثلاثة من الحواف التى تحد الألواح التكتونية ، (الفصل الأول) . وتتصل حواف الألواح الثلاثة مع بعضها بعضًا لتكوّن شبكة متصلة تحيط بالكرة الأرضية . وقد كان العالم الكندى ويلسون J.T.Wilson أول من اقترح أن الصدوع مضربية الانزلاق ، والتى تكوّن حدود الألواح هى نوع خاص من تلك الصدوع ، يمكن تسميتها **بالصدوع الناقلة transform faults** (شكل 11.1).

وتسمى الحركة الأفقية على امتداد المضرب ، والتى تكون فى الوقت نفسه رأسية إلى أعلى أو إلى أسفل على

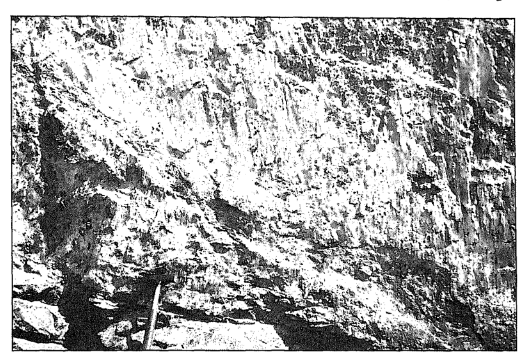
امتداد الميل بأنه صدع مائل الانزلاق **oblique-slip fault** (شكل 21.10هـ) . كما يسمى الصدع الذى تكون حركة أحد جانبيه دورانية على محور متعامد على مستوى الصدع ، حيث تزداد الإزاحة كلما بعدنا عن المحور وعلى امتداد المضرب بصدع مفصلى **hinge fault** ؛ بمعنى أن الانزلاق يتلاشى فى الصدع المفصلى على امتداد المضرب وينتهى عند نقطة محددة (شكل 21.10و) ، ويعتقد أنه يتكون نتيجة القوى نفسها التى تكوّن الصدع العادى.

شكل (**26.10**): صورة لنطاق صدع البحر الميت . لاحظ الصدوع شبه المتوازية والأحواض بين الصدوع .
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

2. الأدلة على حدوث الحركة على امتداد الصدوع

تنتشر الكسور فى الصخور ولكن لا يمكن التعرف من النظرة الأولى عما إذا كانت قد حدثت حركة على امتداد هذه الكسور أم لا . بمعنى آخر ، هل هذه الكسور فواصل أم صدوع؟ . وفى كثير من الأحيان لا يكون من السهل معرفة ما إذا كانت قد حدثت إزاحة أم لا ، كما فى حالة ما إذا كان الصخر متجانسا ومتساوى الحبيبات كالجرانيت ، أو إذا كان الصخر مكوّنا من طبقات رقيقة لا يوجد شىء يميز أيا منها . ومع ذلك ، فإنه قد يكون ممكنا تعرف سطح صدع أو صخر مجاور تماما له تظهر فيه دلائل على حدوث تشوه محلى ، وبالتالى حدوث حركة . وفى بعض الحالات الخاصة الأخرى ، يمكن تعرف اتجاه الحركة النسبية .

وتسبب أحيانا حركة كتل الصخور على جانبى الصدع أن تصبح أسطح الصدع ناعمة، وبها خدوش أو أخاديد قليلة العمق . وتسمى الأسطح التى بها خدوش ، والتى تكونت نتيجة الحركة على امتداد الصدع **بخدوش الصدع أو بمصقل سحجى slickenside** . وتدل الخدوش والأخاديد المتوازية على السطح على اتجاه أحدث حركة حدثت على هذا الصدع (شكل 27.10) . ولا تتكون فى كل الصدوع خدوش من الصدع . وفى أحيان كثيرة ، تؤدى حركة الصدع إلى طحن الصخور الموجودة على جانبى سطح الصدع ، وتحوله إلى كتلة من قطع غير متساوية تعرف بريشيا الصدع **fault breccia**. وقد تؤدى حركة الصدوع إلى الطحن الشديد لكسرات الصخور لدرجة قد لا يمكن ملاحظتها تحت الميكروسكوب . ومن أوضح الأدلة على الصدع إزاحة جزء من جدة موازية sill أو عرق أو طبقات مميزة بالنسبة لجزء آخر من الصخر أو التركيب نفسه .



شكل (27.10): خدوش الصدع (مصقل سحجى) slickenside تكونت نتيجة حركة كتل من صخور السربنتينيت على جانبى الصدع ، حيث تتكون خدوش أو أخاديد قليلة العمق ، جبل المندسة ، دولة الإمارات العربية المتحدة . (د. على فراج عثمان ، قسم الجيولوجيا – جامعة عين شمس) .

3. العلاقة بين الطيات والصدوع

لاتستمر الطيات والصدوع إلى مالانهاية ، بل تميل الصدوع إلى أن تضمحل مثل الطيات ، كما تضمحل الطيات حتى تصبح تجعدات أصغر فأصغر حتى تنتهى ، كما تضمحل التجعدات وتنتهى فى قطعة من القماش .

وعندما يتعرض نوعان من الصخور للإجهادات (الضغوط) نفسها ، فإن كان أحد النوعين من مادة قصفة تتشوه بالكسر ويتشوه النوع الثانى بالتشوه اللدن، فإنه تتكون طيات أحادية الميل نتيجة اختلاف طريقة تشوه النوعين . وتنتج معظم الطيات أحادية الميل نتيجة تحرك طبقات لدنة مسطحة فوق صدع ، مما يسبب انحناء هذه الطبقة .

ويلاحظ أن بعض صدوع الدسر الكبيرة فى جبال الألب ، ربما بدأت كطيات مضطجعة . وكما يوضح شكل (28.10) فإن زيادة الإجهاد باستمرار تؤدى إلى تشويه الطية المضطجعة ، ويشد الطرف المقلوب overturned limb فى الطية إلى أن ينكسر فى النهاية ويصبح صدع دسر . وقد تصل الحركة على بعض الطيات المضطجعة الكبيرة وصدوع الدسر فى جبال الألب إلى ما يزيد عن 50 كم .

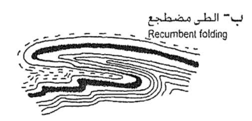
V. تفسير التاريخ الجيولوجى

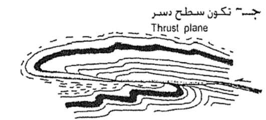
التاريخ الجيولوجى لمنطقة ما هو تتابع لمجموعة من أحداث التشوه والعمليات الجيولوجية الأخرى . فإذا أخذنا منطقة يبدو تاريخها الجيولوجى صعب التفسير، فإننا نحاول أن نرى كيف أن بعض المفاهيم التى تم معالجتها فى هذا الفصل تؤدى إلى تفسير بسيط للتاريخ الجيولوجى لتلك المنطقة . ويوضح (شكل 29.10) مثالا لمنطقة شهدت التتابع التالى للأحداث الجيولوجية:

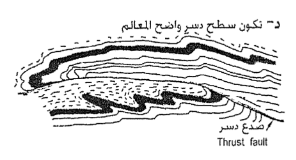
- ترسبت طبقات رسوبية أفقية فوق صخور القاعدة وتحولت إلى طبقات مائلة . ويمثل السطح بين

صخور القاعدة والصخور الرسوبية سطح عدم توافق رقم (1) .









شكل (**28.10**): مراحل تكوّن صدوع الدسر **thrust faults** من الطيات المضطجعة **recumbent folds**. ويميز هذا النوع من التراكيب جبال الألب والعديد من المناطق الجبلية الأخرى .

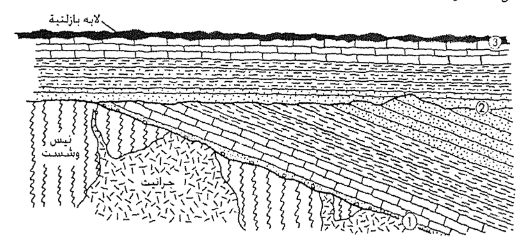
- رفعت هذه الطبقات فوق سطح البحر ، حيث تعرضت للتعرية وتكوّن سطح أفقي جديد يمثل سطح عدم توافق رقم (2) .
- هبطت المنطقة مرة أخرى تحت سطح البحر ، حيث ترسبت طبقات رسوبية أفقية . ويمثل السطح الفاصل بين الصخور الرسوبية المائلة والطبقات الرسوبية الأفقية فوقها سطح عدم توافق رقم (2) .
- رفعت تلك الطبقات مرة أخرى فوق سطح البحر ، حيث تعرضت للتعرية وتغطت الطبقات الرسوبية

بلابة بازلتية نتيجة انشقاق بركاني حدث نتيجة قوى داخلية فى الأرض . ويمثل السطح رقم (3) سطح عدم توافق تبايني يفصل بين الصخور الرسوبية عن صخور اللابة البازلتية .

وبالطبع .. فإن الجيولوجي لا يشاهد إلا المرحلة النهائية من هذا التاريخ ، ولكن عليه أن يتخيل كل هذه المراحل ؛ حيث يبدأ الجيولوجي من قاعدة أن الطبقات لابد أنها ترسبت أفقية وغير مشوهة عند قاع محيط قديم ، ثم يقوم بإعادة ترتيب بقية الأحداث.

إن التضاريس التى نراها اليوم ، كتلك التى توجد فى جبال الألب وجبال روكى ، وسلاسل المحيط الهادئ والهيمالايا ، تكونت نتيجة تشوهات تكتونية حدثت على امتداد عشرات الملايين من السنين . ومازالت تحتفظ هذه السلاسل الجبلية الحديثة بالكثير من المعلومات التى يحتاجها الجيولوجي؛ ليقوم بجمعها مع بعضها بعضا لتفسير تاريخ هذه التشوهات . أما التشوه الذى حدث منذ مئات الملايين من السنين فى سلاسل الجبال القديمة ، مثل جبال البحر الأحمر بالصحراء الشرقية بمصر ، فإن التعرية قد تركت بقايا فقط من الطيات والصدوع فى **صخور القاعدة basement rocks** القديمة داخل القارات (صخور القاعدة هى أقدم الصخور فى منطقة ما ، وتمثل تجمعًا من الصخور النارية والمتحولة تعلوه المتكوّنات الرسوبية الأحدث ، وعادة ما تكون من صخور ما قبل الكمبرى أو الباليوزوى) .

وكما رأينا ، فإن التشوه الذى يؤدى إلى تكوّن أحزمة جبال ، وما تشمله من تراكيب كالطيات والصدوع ووديان الخسف والصدوع مضربية الانزلاق ، يترك آثارا لا يمكن إغفالها على تضاريس الأرض ؛ فهذه المعالم الطوبوغرافية تكون غالبا أدلة على تراكيب التشوه التى شكلتها . وغالبا ما تتكون أيضا بعض



شكل (29.10): تتابع الأحداث الجيولوجية التى تؤدى إلى تكوين علاقة عدم التوافق unconformity .

المعالم الصغيرة مثل أشكال التلال والوديان ومجارى المياه نتيجة التداخل بين التراكيب تحت السطحية والتجوية.

ومن المهم أن نتذكر أن طوبوغرافية منطقة ما لاتتحدد نتيجة التراكيب فقط . فأحيانا ، يتكون وادى فى وسط طية مقعرة أو مرتفعة عند قمة طية محدبة ، ولكن ليس من الضرورى أن نتوقع أن تكون كل هامات التحدبات مرتفعات ، أو أن تكون كل الأجزاء المنخفضة فى الطيات المقعرة وديانا . فمن العوامل المهمة فى تحديد شكل تضاريس الأرض فوق صخور منطقة ما مقدار مقاومة الطبقات للتجوية والتعرية ، وما إذا كانت تلك الطبقات مائلة أو مطوية أو متصدعة .

وقد أوضح الاستعراض السابق أن هناك نمطًا فى الطريقة التى تتشوه بها الصخور ، والذى يرتبط بالقوى الموجودة فى القشرة الأرضية . وتلعب حركة الألواح دورًا مهمًا فى نشأة هذه القوى . ولقد أصبح واضحًا كيفية فهم وتفسير هذا النمط ، بادئين من تكوّن الصخور ، ثم إعادة بناء التشوهات اللاحقة والتعرية.

الملخص

1. يمكن أن تتشوه الصخور بطرق ثلاثة هى : التشوه المرن حيث لا يوجد تغير دائم ، أو التشوه اللدن فى الطيات ، أو بالكسر فى الصدوع والفواصل .
2. يزيد الإجهاد (الضغط) الحابس العالى ودرجات الحرارة العالية صفات اللدونة ، بينما تزيد درجاتُ الحرارة المنخفضة والإجهاد الحابس المنخفض صفاتِ المرونة والتشوه بالكسر حين يتعدى الإجهاد حد المرونة .
3. يحدد المعدل الذى يتشوه عنده الجسم الصلب (الانفعال) نوع التشوه ، فبينما تؤدى معدلات الانفعال العالية إلى التشوه بالكسر ، فإن معدلات الانفعال المنخفضة تسبب التشوه بالطى .
4. تميز صفات اللدونة الصخور الأضعف مثل : الحجر الجيرى والرخام والإردواز والفيليت والشست ، بينما تتميز الصخور الأقوى مثل : الحجر الرملى والكوارتزيت والجرانيت بصفات التقصف . كما تكون الصخور الجافة أقوى من الصخور الرطبة .

5. يحدد توجيه مستويات التطبق والصدوع والفواصل أو أية مستويات مائلة أخرى بواسطة المضرب (اتجاه تقاطع المستوى المائل مع المستوى الأفقى) والميل (الزاوية بين المستوى المائل والأفقى) .

6. يسبب التشوه اللدن للطبقات تكوّن انثناءات تسمى طيات . ويحدث الطى نتيجة الإجهاد التضاغطى . ويسمى تقوس الطية إلى أعلى تحدبا ، بينما يسمى الطى إلى أسفل تقعرا، وتسمى الطبقات التى توجد على جانبى الطية بالطرفين .

7. تكون الطيات المقلوبة (يميل كل من طرفى الطية فى الاتجاه نفسه) شائعة فى سلاسل الجبال المتكونة نتيجة التصادم القارى . وفى بعض السلاسل الجبلية ، فإن طرفى الطية المقلوبة يكونان فى وضع أفقى تقريبا ، وتسمى الطية فى هذه الحالة بالطية المضطجعة .

8. تعرف الكسور فى الصخور التى يحدث عليها انزلاق للكتل الصخرية بالصدوع . وتسبب إجهادات الشد التى تميل إلى جذب القشرة الأرضية من ناحيتين إلى تكوّن الصدوع العادية ، بينما تتكون صدوع الدسر والصدوع المعكوسة من الإجهادات التضاغطية التى تؤدى إلى عصر (ضغط) القشرة الأرضية وتقصيرها ، وبالتالى زيادة سمكها . وتنشأ الصدوع مضربية الانزلاق من إجهادات القص أو الضغط، وهى كسور رأسية تحدث عليها حركة أفقية.

9. يمكن عادة تحديد الحركة النسبية للصخور على جانبى سطح الصدع .

10. تضمحل الصدوع حتى تصبح طيات ، بينما تنتهى الطيات بأن تصبح على هيئة تجعدات أصغر وأصغر .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://sepwww.stanford.edu/oldsep/joe/fault_images/BayAreaSanAndreasFault.html
http://www.prenhall.com/tarbuck
http://www.mhhe.com/earthsci/geology/plummer-old/www.mhtml

المصطلحات الهامة

angle of dip	زاوية الميل
anticline	تحدب (طية محدبة)
asymmetrical fold	طية غير متماثلة
axial plane	مستوى محورى
axis (of a fold)	محور الطية
basin	حوض
brittle	قصف
columnar jointing	فواصل عمدانية
compressional stress	إجهاد تضاغطى
confining stress	إجهاد حابس
differential stress	إجهاد تفاضلى
direction of dip	اتجاه ميل
dome	قبة
ductile deformation	تشوه لدن
elastic deformation	تشوه مرن
elastic limit	حد المرونة
fault	صدع
fault breccia	بريشا الصدع
fold	طية
fold axis	محور طية
fold belt	حزام طى
footwall block	حائط سفلى (لصدع)
fracture	كسر
geologic cross section	قطاع عرضى جيولوجى
graben	أخدود
half- graben	نصف أخدود
hanging wall block	حائط علوى
hinge fault	صدع مفصلى
horst	جسر (نتق)
isoclinal fold	طية متفقة الميل
joint	فاصل
limbs of a fold	طرفى الطية
monocline	طية أحادية الميل (وحيد الميل)
normal fault	صدع عادى
plastic deformation	تشوه لدن
plunge	غطس (الطية)
plunging fold	طية غاطسة
oblique-slip fault	صدع مائل الانزلاق
offset	فاصلة أفقية
open fold	طية مفتوحة
overturned fold	طية مقلوبة
recumbent fold	طية مضطجعة
reverse fault	صدع معكوس
rift	خسيف
rift valley	وادى خسف
slickenside	خدوش الصدع (مصقل سحجى)
shear stress	إجهاد القص
strain	انفعال
strike	مضرب
strike- slip fault	صدع مضربى الانزلاق
structural geology	جيولوجيا تركيبية
syncline	تقعر (طية مقعرة)
tectonics	جيولوجيا بنائية (بنائيات)
tensional stress	إجهاد الشد
thrust fault	صدع دسر
transform fault	صدع ناقل

الأسئلة

1. عرف الإجهاد والانفعال، وبين العلاقة بينهما .
2. لماذا يمكن طي بعض طبقات الصخور وكسر بعضها الآخر، عند التعرض لقوى في القشرة الأرضية ؟
3. اذكر التراكيب التي تتكون بالتشوه، والتي يمكن توقعها عند الأنواع الثلاثة من حدود الألواح التكتونية .
4. اذكر أسماء ثلاثة صخور تتشوه بالتشوه اللدن، وثلاثة أخرى تميل لأن تتشوه بالكسر.
5. كيف يمكنك تعرف صدع في الحقل ؟ وكيف يمكنك تحديد ماذا كان الصدع عاديا أو معكوسًا؟
6. ارسم قطاع عرضي لوادي خسف، ووضح بالأسهم طبيعة القوى التي تسببه . وضح بالطريقة نفسها صدع الدسر .
7. ما القوى الأخرى التي تسبب تشوه الصخور غير قوى القشرة الأرضية ؟
8. وضح الطريقة التي يعمل بها الصدع الناقل، ولماذا يسمى هذا النوع من الصدوع الناقلة ؟ وضح مثالا لصدع ناقل مازال في حالة نشاط .
9. وضح بالرسم الطية المحدبة وحدد محورها والمستوى المحوري وطرفي الطية.
10. ارسم خريطة جيولوجية لتحدب غاطس ناحية الغرب وحدد المضرب، واتجاه الميل في عدة أماكن حول الطية. ارسم محور الطية .
11. ما الطية المضطجعة، وأين يمكن أن نتوقع وجود طيات مضطجعة كبيرة؟ صف الطريقة التي يمكن أن تتحول بها الطية المضطجعة إلى صدع دسر.
12. إذا كان لديك خريطة جيولوجية لا يتوافر معها قطاعات عرضية، كيف يمكنك التمييز بين طية محدبة وأخرى مقعرة ؟
13. تتميز معظم الطيات المحدبة بأن طرفي الطية يميلان للخارج بعيدًا عن محور الطية، اذكر أنواع الطي التي تختلف عن ذلك الوضع .
14. ما المعالم التي يمكن البحث عنها في طبقات الصخور الرسوبية أو البركانية لتحديد ما إذا كان الصخر جزءًا من طرف طية مقلوبة أم لا ؟
15. هل تسمى الصدوع التي تحرك صخرا قديما فوق صخر أحدث بالصدوع العادية أم صدوع دسر أم صدوعًا مضربية الانزلاق؟

الفصل

11

الانهيال الكتلى

I. أسباب تحرك الكتل

أ. طبيعة المواد المكونة للمنحدرات

1. المواد غير المتماسكة

2. المواد المتماسكة

ب. المحتوى المائى

ج. درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها

د. بادئات (محفزات) التحرك الكتلى

II. تصنيف عمليات الانهيال الكتلى

أ- انهيار المنحدرات

1. السقوط الصخرى

2. الانزلاقات

ب. انسيابات الرواسب

1. انسيابات الطين المائع

2. الانسيابات الحبيبية

ج. الانهيال الكتلى فى المناخات الباردة

1. الانتفاخ الصقيعى والزحف

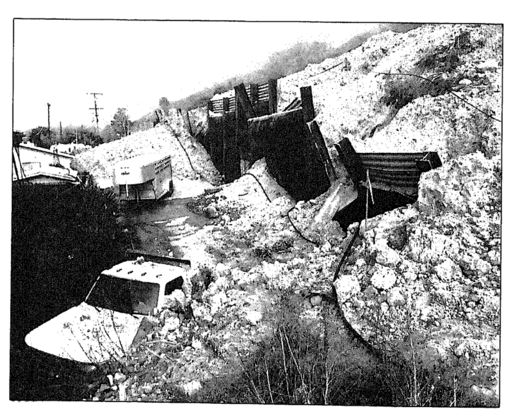
2. المثالج الصخرية

د. الانهيال الكتلى تحت الماء

III. الانهيال الكتلى وتكتونية الألواح

IV. تجنب أو تخفيف آثار الانهيال الكتلى

تنقل إلينا وسائل الإعلام بين الحين والآخر أخبار الانهيارات الأرضية والتدفقات الطينية وآثارها المدمرة. ومثال ذلك ما حدث يوم 13 نوفمبر 1985م فى كولومبيا بأمريكا الجنوبية ، حيث تسببت تدفقات الطين فى مدينة أرميرو Armero فى موت أكثر من 20000 شخص . كما وافتنا وكالات الأنباء بأنه فى يوم 13 يونيو 2001م قتل أكثر من 41 شخصا فى انهيار أرضى ، حيث دفنوا تحت الطين والصخور التى سقطت من جبل فى منطقة نابو Napo بالإكوادور بأمريكا الجنوبية. ولقد تسببت الانهيارات الأرضية فى تحطيم 400 منزل وخلفت أكثر من 700 شخص بلا مأوى ، كما أفسدت المحاصيل وأهلكت الحيوانات وفى نفس الوقت ، اندلعت النيران فى خط أنابيب نفط الإكوادور والذى يبعد 30 كم شرق كيتو Quito عاصمة الإكوادور ، نتيجة سقوط جزء من الجبل على خط الأنابيب . كما لم تستطع السلطات تحديد عدد الأشخاص المفقودين فى المدن المختلفة نتيجة الفيضانات . وقد حدث مؤخرا فى ديسمبر 2005م انهيار أرضى فى إحدى القرى بالقرب من العاصمة اليمنية صنعاء أسفر عن موت 30 شخصا على الأقل ، بالإضافة إلى عدد كبير من المفقودين وتدمير عديد من المنازل (شكل 1.11).



شكل (**1.11**): الانهيار الأرضى الذى حدث فى إحدى القرى بالقرب من العاصمة اليمنية صنعاء فى ديسمبر **2005**م . (صورة من شبكة المعلومات الدولية - الإنترنت) .

وفى مصر ، فقد تسببت الانهيارات الأرضية فى تهدم بعض المبانى وجزء من الطريق الرئيسى فى الأجزاء الجنوبية والجنوبية الغربية لمدينة المقطم التى تقع فوق الهضبة العليا لجبل المقطم فى شرق القاهرة . كما تسبب انهيار حافة الهضبة العليا لجبل المقطم فى تراجع الحافة فى بعض أجزاء مدينة المقطم بحوالى 55 مترا . وسنناقش أسباب هذا الانهيار بعد دراستنا لأسباب الانهيال الكتلى وتصنيفه .

وكل ما سبق وصفه هو انهيارات أرضية تنتج عن تحرك كتلى **mass movement** يطلق عليه أيضا الانهيال الكتلى **mass wasting** ، وهو أحد أنواع تحرك كتل التربة أو الصخور أو الطين أو أى مواد غير متماسكة على المنحدرات تحت تأثير الجاذبية الأرضية . ولا تتحرك هذه الكتل فى الأصل نتيجة تأثير أحد عوامل التعرية ، مثل الرياح أو المياه الجارية أو جليد المثالج ، ولكن يحدث التحرك الكتلى حينما تزيد قوة الجاذبية الأرضية عن قوة تماسك مواد المنحدرات . وتعمل الزلازل والفيضانات أو أى عوامل جيولوجية أخرى على تنشيط هذه التحركات ، حيث تتحرك الكتل حينئذ إلى أسفل المنحدرات إما بمعدل بطئ (أو بطئ جدا) أو بمعدل تحرك كبير مفاجئ يصل أحيانا إلى حد الكارثة . وقد يسبب التحرك الكتلى إزاحة كميات صغيرة غير محسوسة من التربة إلى أسفل على الجانب اللطيف لتل ، أو قد تسقط أطنان من الكتل الأرضية والصخور إلى قاع الوادى على الجوانب شديدة الانحدار للجبال نتيجة الانزلاق الأرضى . ويحدث التحرك الكتلى نتيجة اشتراك عمليات السقوط أو الانزلاق أو الانسياب أو جميعها معا ،وهو ما سنستعرضه فيما بعد .

ويشمل الانهيال الكتلى mass wasting كل العمليات التى تنحدر فيها كتل من الصخور أو التربة على المنحدرات تحت تأثير الجاذبية ، لتحملها عوامل النقل لمسافات بعيدة. والانهيال الكتلى أحد نواتج عملية تجوية وتكسر وتفتيت الصخور، ويمثل جزءا مهما من عملية التعرية العامة للأرض ، خاصة فى المناطق الجبلية أو التى تحتوى على تلال . وتغير التحركات الكتلية من طوبوغرافية الأرض نتيجة تحرك كتل كبيرة من جوانب الجبال نتيجة السقوط أو الانزلاق بعيدا عن المنحدرات . وتشكل المواد المتحركة فى النهاية ألسنة أو امتدادات من الحطام على قاع الوادى، أو قد تتراكم فى بعض الأحيان لتسد مجرى مائى على امتداد الوادى . وتعتبر رواسب الركام والأماكن الغائرة التى تتركها الكتل المتحركة والتى تعرف بالندباتscars دلائل على حدوث الانهيال الكتلى فى الماضى . ويستخدم الجيولوجيون هذه الشواهد فى التنبؤ والتحذير من حدوث انهيالات كتلية جديدة ، كما يحذرون من القيام بأى نشاطات يكون من شأنها تفعيل هذه التحركات مثل القيام ببعض العمليات والإنشاءات الهندسية.

وسنستعرض فى هذا الفصل أسباب تحرك الكتل وتصنيفها ، وعلاقة تحرك الكتل بتكتونية الألواح ومحاولات تجنب آثار الانهيال الكتلى .

ا. أسباب تحرك الكتل

لقد أوضحت الدراسات الحقلية أن هناك ثلاثة عوامل رئيسية تؤثر على التحركات الكتلية (جدول 1.11) وهى (أ) طبيعة المواد المكونة للمنحدرات ، و(ب) كمية الماء المحتوى فى هذه المواد ، و(3) درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها ، ونعرض فيما يلى لكل من هذه العوامل بالتفصيل .

جدول (1.11): العوامل التى تسبب تحرك الكتل

طبيعة مواد المنحدر	درجة ميل المنحدر	المحتوى المائى	احتمال الحركة
رمل مفكك أو غرين رملى	زاوية الاستقرار	جاف	مستقر إلا إذا زادت درجة ميل المنحدر عن زاوية الاستقرار بفعل الحفر
		رطب	قد ينساب إذا كان الرمل مشبعا بالماء
خليط غير متماسك من الرمل والغرين والتربة	متوسطة	جاف	مستقر إلا إذا زادت شدة انحداره
		رطب	عرضة للتدهور، أو الانزلاق أو الانسياب
	حادة	جاف	مستقر مؤقتا
		رطب	محتمل جدا أن ينزلق أو ينساب
صخر به فواصل أو مشوه	متوسطة إلى حادة	جاف إلى رطب	محتمل حدوث سقوط صخرى أو انزلاق
صخر كتلى	متوسطة	جاف إلى رطب	مستقر
	حادة	جاف إلى رطب	محتمل سقوط صخرى أو انزلاق

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

أ. طبيعة المواد المكونة للمنحدرات

تختلف المواد المكونة للمنحدرات كثيرا من مكان لآخر، حيث تعتمد على العناصر الجيولوجية المحلية الموجودة فى كل منطقة . فقد يكون المنحدر مكونا من كتل صلبة من صخور الأساس bedrock أو من حطام صخرى (أديم) regolith يتكون من مجموعة الصخور المفتتة فى موضعها أو المنقولة من موضع آخر والتى تغطى صخور الأساس ، وتشتمل على حطام الصخور والرماد البركانى وتراكمات التربة والبقايا النباتية أو الرواسب . وقد تكون مواد المنحدر متماسكة أو غير متماسكة ، ولكن تكون المنحدرات المكونة من مواد غير متماسكة أقل استقرارا من المنحدرات المكونة من مواد متماسكة .

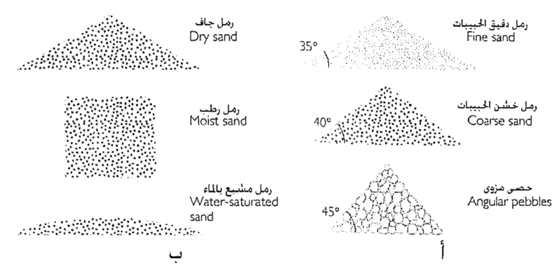
1. المواد غير المتماسكة

يمكن تعرف الطريقة التى تؤثر بها درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها على التحرك الكتلى للمواد غير المتماسكة **unconsolidated materials** من ملاحظة حركة الرمال الجافة المفككة . فالزاوية المحصورة بين درجة ميل المنحدر فى أى كومة من الرمال والمستوى الأفقى تكون ثابتة ، سواء كان ارتفاع كومة الرمل عدة سنتيمترات أو مئات الأمتار . وتبلغ قيمة هذه الزاوية لمعظم الرمال حوالى 35 °. فإذا جرفنا بعض الرمال من قاعدة الكومة ببطىء وحذر زادت زاوية الانحدار قليلا ، ويظل الرمل متماسكا مؤقتا حتى إذا قفز شخص على الأرض بجوار كومة الرمل فإن الرمل يندفع لأسفل على جانب الكومة ، وتسترجع الكومة زاوية الانحدار الأصلية وهى 35 °. وعلى الرغم من أن الرمال المندفعة تبدو وكأنها تتحرك كوحدة واحدة ، إلا أن معظم الحركة تتم عن طريق تحرك الحبيبات كل على حدة فوق وحول بعضها البعض . ويمكن رؤية حركة الرمال هذه على المنحدرات الشديدة للكثبان الرملية .

وتسمى الزاوية الأصلية والمستعادة لكومة الرمل **بزاوية الاستقرار angle of repose** ، وهى أقصى زاوية مقاسة من الأفقى ، يمكن أن يستقر عندها

انحدار المادة المفككة دون أن تنهار . ويكون الانحدار الأكثر حدة من زاوية الاستقرار انحدارا غير مستقر ويميل لأن ينهار ليصل إلى الزاوية المستقرة .

(شكل 3.11أ) . والتوتر السطحى هو الذى يجعل قطرات الماء مستديرة حتى تنخفض طاقة السطح الكلية وينتج عن ذلك خفض مساحة السطح الخارجى



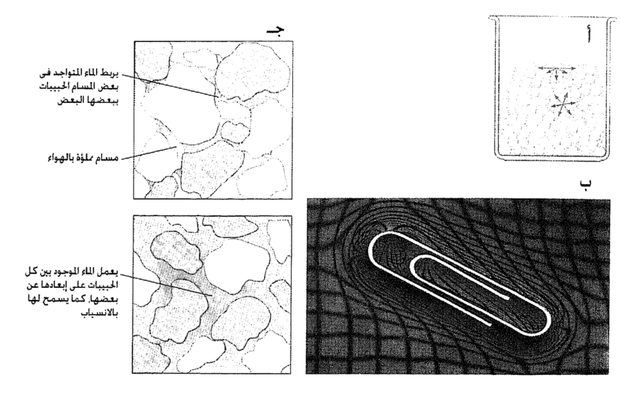
شكل (2.11): استقرار المواد على المنحدرات

أ) تزيد زاوية الاستقرار angle of repose فى كومة من الحبيبات كلما زاد حجم الحبيبات ، وأيضا كلما كانت الحبيبات ذات حواف أكثر حدة .

ب) تعتمد زاوية الاستقرار على كمية الرطوبة بين الحبيبات ، فالرمال الرطبة تترابط مع بعضها بحيث يمكن أن تكون الجوانب رأسية تقريبًا، بينما تنساب الرمال المشبعة بالماء كعدسة رقيقة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وتتغير زاوية الاستقرار بدرجة ملحوظة بسبب عدد من العوامل ، منها حجم وشكل الحبيبات (شكل 2.11) . فالحبيبات المفككة الأكبر حجما والمسطحة الشكل ، والتى يكون لها حواف حادة تبقى مستقرة على المنحدرات الحادة . كما تتغير زاوية الاستقرار أيضا مع كمية الرطوبة الموجودة بين الحبيبات . فزاوية استقرار الرمال الرطبة تكون أكبر من زاوية استقرار الرمال الجافة ، وذلك يرجع إلى أن الرطوبة القليلة الموجودة بين حبيبات الرمل تعمل على ربطها ببعضها البعض بحيث تقاوم الحركة . ويرجع هذا التماسك بين الحبيبات إلى ظاهرة التوتر السطحى **surface tension** ـ قوة الجذب بين الجزيئات عند سطح ما لقطرات الماء. والتوتر السطحى أيضا هو الذى يسمح لشفرة حلاقة صغيرة أو مشبك معدنى للورق أن يطفو على سطح الماء الهادئ (شكل 3.11ب). أما إذا وجدت كمية كبيرة من الماء بين الحبيبات فإنها تعمل على إبعاد الحبيبات عن بعضها البعض ، بما يسمح لها بحرية الحركة فوق بعضها البعض . ويتحرك الرمل المشبع بالماء مثل الموائع، وينهار على شكل كعكة مستوية أو عدسة رقيقة ، (شكل2.11). والتوتر السطحى هو الذى يربط حبيبات الرمل ويسمح لبعض الأشخاص على الشواطئ أن يبنوا قلاعا من الرمال . ولكن عندما تتشبع هذه الرمال بالماء ، فإن هذه الأشكال تنهار.



شكل (3.11): التوتر السطحى surface tension.

أ. تنجذب الجزيئات الموجودة فى وسط السائل من جميع الاتجاهات، أما الجزيئات الموجودة عند السطح فتنجذب للداخل فقط، مما يؤدى إلى حدوث ظاهرة التوتر السطحى.

ب. يسبب التوتر السطحى أن يطفو مشبك الورق على سطح الماء، كما لو كان سطح الماء عبارة عن غشاء مرن يمنع المشبك المعدنى من السقوط فى الماء.

جـ. فى التربة غير المشبعة بالماء، يعمل التوتر السطحى الناشىء عن وجود غشاء رقيق من الماء يغلف الحبيبات على ربطها معا مما يعوق حركتها. أما عندما تصبح التربة مشبعة، فإن الماء يملأ كل المسافات بين الحبيبات وتصبح الحبيبات متباعدة عن بعضها وتنساب بسهولة.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

2. المواد المتماسكة

لا يكون للمواد المتماسكة consolidated materials الجافة مثل الرواسب المضغوطة والمتلاحمة ببعضها والتربة المزروعة زاوية استقرار كتلك التى تميز المواد المفككة. وقد تكون منحدرات المواد المتماسكة أكثر حدة وأقل انتظاما، ولكنها تصبح غير مستقرة عندما تزيد زاوية الانحدار أو عندما تزال النباتات منها.

وقوى التجاذب التى تربط بين حبيبات المادة الصلبة الجافة نوعان: تماسكية cohesive ولاصقة adhesive. وترتبط حبيبات الرواسب المتماسكة مع بعضها البعض بروابط تماسكية، مثل الصلصال الكثيف. وعموما، فإن التماسك هو قوى جذب بين حبيبات مادة صلبة من النوع نفسه تكون قريبة من بعضها البعض. ويوضح شكل (3.11 أ) القوى التماسكية المؤثرة فى سائل، أما الالتصاق adhesion فهو قوى جذب بين حبيبات من أنواع مختلفة.

وتسمى مقاومة الحركة الناتجة عن قوى التماسك والتلاصق والتلاحم وتأثير جذور النباتات بالاحتكاك الداخلى internal friction، لأنها تشبه الاحتكاك

الذى يقاوم الحركة بين أجزاء المادة . وتكـون الحبيبـات فى المواد ذات الاحتكاك الداخلى العالى غير حرة بـنفس درجة تحرك الحبيبـات المفككـة مثـل حبيبـات الرمـل . وعندما تتحرك هذه المـواد ، فإنهـا تميـل إلى أن تتحـرك كوحدة واحدة .

ب. المحتوى المائى

تعتمـد كميـة المـاء الموجـودة فى المـواد عـلى درجـة مسامية هذه المواد ، وكمية ماء المطر أو أى ميـاه أخـرى تعرضت لها هذه المواد . ويرجع التحرك الكتلى للمـواد المتماسكة إلى تأثير الرطوبة ، بالإضافة إلى عوامل أخرى مثل زيادة شـدة انحـدار المنحـدرات وإزالـة النباتـات الموجودة بها ، حيث تصبح التربة غير متماسـكة بـسبب عدم وجود جذور النباتات وبالتالى تكون عرضة للتأثر بالماء وعدم الاستقرار. وعندما تـصبح الأرض مـشبعة بالمــاء ، فـإن المـادة تـصبح زلقـة ويـنخفض بالتـالى الاحتكـاك الـداخلى بهـا وتـستطيع الحبيبـات التحـرك بسهولة أكبر بالنسبة لبعضها البعض . وقد يتسرب الماء فى مستويات التطبق للرواسب الطينية أو الرملية مـثلا، ويزيد من معدل انزلاق الطبقات فوق بعضها البعض . ويشبه ذلك الوضع القيادة تحت تـأثير المطـر الـشديد ، حيث تنزلق إطارات السيارات عـلى الطريـق ممـا يفقـد الـسائق الـتحكم فى المركبـة . وممـا يـساعد عـلى زيـادة الضغط تحـت كتـل الـصخور المتحركـة وجـود الهـواء المختلط مـع الرواسـب ، ممـا يقلـل أيـضا مـن عمليـة الاحتكاك .

وعندما تمتص المواد المتماسكة كميات كبيرة من الماء، فإن ضغط الماء فى مسام المادة يكون كبيرا بدرجة تكفـى لفصل الحبيبات وتنتفخ الكتلة ، وتبدأ المـادة حينئـذ فى الانسياب مثل المواد المائعة .

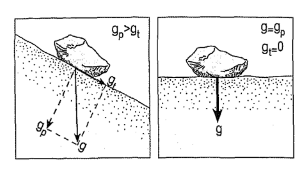
وهكذا يمكن وصف تأثير الماء على تحرك الـصخور والرواسب على المنحدرات تحـت تـأثير الجاذبيـة ، بأنـه نتيجـة لعـاملين مهمـين همـا (1) انخفـاض التماسـك الطبيعى بين الحبيبات ، و (2) انخفاض الاحتكاك عند قاعدة كتلة الصخر نتيجة زيادة ضغط السائل .

ج. درجة ميل المنحدرات وعدم استقرارها

تؤدى شدة انحدار المنحدرات وعدم اسـتقرارها إلى سهولة سقوط fallوانـزلاق sliding أوانـسياب flow الكتل الصخرية تحت تأثير الظروف المختلفة . وتتراوح درجة ميـل المنحـدرات بـين انحـدارات لطيفـة نـسبيا لطبقات الطفل والرماد البركـانى إلى انحـدارات حـادة لجـروف الـصخور الـصلدة مثـل الجرانيـت . ويمكـن التعبـير عــن اسـتقرار منحـدر مـا بالعلاقـة بـين تلـك الإجهادات التى تعمل على أن تغير مـن اسـتقرار مـواد الانحدار وتسبب تحركهـا ، والقـوى التـى تعمـل عـلى مقاومـة تلـك الإجهـادات الدافعـة . وتـسمى القـوة الدافعة التى تعمل عـلى أن يتحـرك جـسم مـا فى اتجـاه ممـاس لمـستوى الانحـدار **بإجهـاد القـص shear stress** .

والعامل الأساسى الذى يؤثر فى إجهاد القـص هـو الـشد بالجاذبيـة ، والـذى يتـأثر بـدوره بدرجـة ميـل المنحدر. حيث تعمل الجاذبية على جـذب الأجـسام فى اتجـاه عمـودى عـلى الـسطح الأفقـى (شـكل 4.11). ويمكن تحليل قوة الجاذبية فوق أى منحدر إلى مـركبتين متعامدتين ، إحداهما تكون عمودية على اتجـاه المنحـدر (g_pفى شكل 4.11) ، وتعمل على تثبيـت الأجـسام فى أماكنها ، أمـا المركبـة الأخـرى فتكـون مماسـة للجـسم وتعمل فى خط مواز للمنحدر (g_t) ، وهى التى تـسبب تحرك الأجسام فى اتجـاه ميـل المنحـدر. وعنـدما تـزداد درجة ميل المنحدر ، فإن المركبة المماسة تزيد عن المركبـة العمودية ويصبح إجهاد القص أكبر. أمـا القـوة الثانيـة التى تعمل على مقاومة تلك القوة الدافعة وتسمى **قـوة القص shear strength** ، فهـى المقاومـة الداخليـة

للجسم لمثل هذا التحرك . ويتحكم فى قوة القص عدة عوامل موجودة فى مادة الصخر أو الحطام الصخرى . وتشمل هذه العوامل مقاومة الاحتكاك والتماسك بين الحبيبات والتماسك بفعل جذور النباتات .



شكل (4.11): تأثير الجاذبية الأرضية على صخر موجود فوق منحدر تل . تعمل الجاذبية رأسيا ويمكن تحليلها إلى مركبتين ، إحداهما تكون عمودية على اتجاه سطح المنحدر (gp)، والأخرى مماسة لسطح المنحدر(gt).

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وعندما تكون قوة القص أكبر من إجهاد القص ، فإن الصخر أو الغطاء الصخرى لايتحرك . وتحدث الحركة بالطبع عندما تزيد القوة الدافعة (إجهاد القص) عن قوة المقاومة (قوة القص) . ويمثل هذه العلاقة أيضاً ما يعرف باسم عامل الأمان safety factor للانحدار، ويعبر عنه بالنسبة التالية: معامل الأمان Fs = قوة القص ÷ إجهاد القص .

وعندما تكون قوة القص shear strength أكبر بدرجة ملحوظة من إجهاد القص shear stress يوصف المنحدر بأنه مستقر (معدل أكبر من 1.3) ولا تحدث بالتالى أى تحركات . وعندما يزيد إجهاد القص عن قوة القص (معدل أقل من 1) فمن المفترض حدوث حركة على المنحدر فى توقيت قريب ، ويوصف المنحدر حينئذ بأنه غير مستقر .

وبالإضافة لما سبق ، فإن تركيب الطبقات يؤثر على استقرارها ، خاصة حينما يكون ميل الطبقات موازيا لزاوية ميل الإنحدار . فقد تكون أسطح التطبق نطاقات ضعف محتملة ، لأن الطبقات المتجاورة تختلف فى تركيبها المعدنى والنسيج أو فى قابليتها لامتصاص الماء. فمثل هذه الطبقات قد تصبح غير مستقرة ، حيث تنزلق كتل الصخور على امتداد أسطح التطبق الضعيفة.

وتؤثر كل العوامل الثلاثة السابقة وأيضا النشاط البشرى أثناء عمليات حفر وإنشاء المبانى ومد الطرق فى استقرار المنحدرات ، حيث تعمل على تقليل مقاومة الكتل الصخرية للتحرك ، مما يساعد قوة الجاذبية على جذب الكتل فتسقط وتنزلق على المنحدرات .

د. بادئات (محفزات) التحرك الكتلى

إذا توافرت فى منطقة ما العوامل المؤدية إلى عدم استقرار المنحدرات (المواد المكونة للمنحدر، والرطوبة، وحدة زاوية الانحدار) فإنه لا يمكن تجنب حدوث انزلاق للصخور ، وكل ما يحتاجه الأمر عندئذ هو وجود عامل منشط لبدء الحركة ، حيث يمكن أن تسبب عاصفة ممطرة شديدة بدء انزلاق أو فيضان الركام . وفيما يلى استعراض سريع للعوامل التى تعمل على بدء التحرك الكتلى :

1. التقوض undercutting هو إزالة المواد من قاعدة جرف أو منحدر شديد الميل أو وجه صخرى مكشوف. وقد يحدث ذلك بفعل البشر خلال أعمال الإنشاءات الهندسية على الطرق وخلافه ، أو بفعل عوامل طبيعية مثل تعرية الماء الساقط أو الجارى أو حركة الأمواج على الشاطئ.
2. زيادة الحمل overloading على المنحدر (مثل إنشاء المبانى) بحيث لا يستطيع تحمل الوزن المضاف ، ولذلك فإنه ينزلق أو ينساب .
3. الذبذبات من الزلازل أو التفجيرات فى بعض المحاجر (مثل منطقة المقطم شرق القاهرة) مما يؤدى

إلى كسر الروابط التى تربط مكونات المنحدر فى مكانها .

4. إضافة الماء ، حيث تكون إضافة الماء موسمية غالبا ، وهذا هو السبب فى أن بعض الأوجه الصخرية المقطوعة حديثا تبقى حتى سقوط الأمطار فى الموسم التالى . ويؤثر الماء بطريقتين: إما بإضافة الحمل على المنحدر، أو بتقليل التماسك الداخلى بين المكونات . والتأثير الرئيسى للماء هو ملء الفراغات بين الحبيبات ، وعند زيادتها فإن الماء الإضافى يملأ كل الفراغات بين الحبيبات بحيث ينعدم تأثير التوتر السطحى الذى يربط الحبيبات مع بعضها البعض . كما أن إضافة الماء إلى بعض معادن الصلصال التى توجد فى بعض أنواع التربة يزيد من حجمها . ولذلك فإن إضافة الماء إلى منحدرات مكونة من هذا النوع من الصلصال المنتفخ يؤدى إلى تنشيط الانهيارات الأرضية .

II. تصنيف عمليات الانهيال الكتلى

تشترك كل عمليات الانهيال الكتلى فى صفة واحدة مميزة وهى حدوثها على المنحدرات . ويعرف أى تحرك محسوس لكتلة من صخور الأساس أو من الحطام الصخرى (الأديم) أو من مخلوط منهما معا لأسفل على أسطح المنحدرات بالانزلاق الأرضى **landslide** . ويمكن تعرف أنواع مختلفة من الحركة على المنحدرات ، ولكن لأنها غالبا ما تتداخل مع بعضها البعض ، فإنه لا يوجد تصنيف بسيط ونموذجى لتلك العمليات . فكما ذكرنا ، فإن تركيب ونسيج الراسب المكون للمنحدر وكمية الماء والهواء المختلطة مع الرواسب وزاوية ميل المنحدر، تؤثر جميعا على نوع وسرعة الحركة . ويلاحظ أن هناك تدرجًا فى قوة الانهيالات تتراوح بين انسياب مجرى مائى إلى مجرى مائى آخر محمل بالرواسب ، إلى مجموعة عمليات الانهيال الكتلى التى تتراوح بين تلك التى يحفز فيها الماء عملية الانسياب إلى تلك التى لا يلعب فيها الماء دوراً مباشرا أو مهمًا.

ويمكن تقسيم عمليات الانهيال الكتلى إلى مجموعتين رئيسيتين (شكل 5.11) هما :

* **انهيار المنحدرات slope failure** ، وينتج عن الانهيار المفاجئ لمنحدر مما يؤدى إلى نقل كتل متماسكة نسبيا من الصخر أو الحطام الصخرى إلى أسفل على المنحدرات بالسقوط falling أو الانزلاق sliding . وهناك نوعان من الانزلاق أولهما الانزلاق الانتقالى transitional slide ، حيث تتحرك الكتلة الهابطة على أسطح مستوية تقريبا ومائلة ، وثانيهما الانزلاق الدورانى rotational side ويسمى أيضا التدهور slump ، وهو يشمل الحركة على أسطح منحنية ، حيث يتحرك الجزء العلوى للكتلة المنزلقة إلى أسفل ويتحرك الجزء السفلى إلى أعلى .

* **انسيابات الرواسب sediment flows** وهو انسياب مخاليط من الرواسب والماء والهواء إلى أسفل المنحدرات بسبب الحركة الداخلية لكتل الحطام الصخرى . وتتأثر تلك العملية بنسبة الراسب فى المخلوط المنساب وسرعة الانزلاق .

وسنستعرض فيما يلى هذين النوعين من الانهيال الكتلى ، كما سيتم أيضا استعراض سريع لبعض عمليات ورواسب الانهيال الكتلى فى مناطق المناخ البارد وعلى قيعان المحيطات .

أ. انهيار المنحدرات

تعمل الجاذبية الأرضية على انهيار جروف الجبال ومنحدرات التلال باستمرار. وحين يحدث الانهيار فإن الركام الصخرى ينتقل لأسفل على المنحدرات وينشأ

منحدر ثابت جديد . وتعمل الزلازل والمجارى المائية والأمطار الغزيرة المستمرة وانبثاقات البراكين على تنشيط عملية الانهيار . كما ترتبط الانهيارات المتلاحقة بالترسيب السريع للرواسب وزيادة حدة انحدار المنحدر والصدمات الزلزالية . ونعرض فيما يلى لأنواع انهيار المنحدرات slope failure .

1. السقوط الصخرى

السقوط الصخرى **rockfall** هو سقوط حر فى الهواء لكتلة من صخر الأساس أو من الحطام الصخرى من جرف أو منحدر حاد (شكل 5.11 أ) . ويكون سقوط الصخور شائعا فى المناطق الجبلية شديدة الانحدار ، حيث يكوّن الحطام الصخرى رواسب واضحة عند سفوح المنحدرات الحادة. وعندما يسقط الصخر بحرية ، فإن سرعته تزداد كلما زادت مسافة السقوط.

وقد يتضمن سقوط الصخور نزع وسقوط كسرة صخرية واحدة أو قد يتضمن انهيارا مفاجئا لكتلة ضخمة من الصخور التى تندفع من مئات الأمتار لتكتسب سرعة عالية وتتكسر عند الاصطدام بالأرض إلى عدد ضخم من القطع الأصغر التى تتجمع فى النهاية وتتوقف عند أسفل المنحدر . وعند حدوث انهيار صخرى من جبل ، فإن هذا الانهيار لا يشمل الصخور فقط ولكن يشمل أيضا ما يعلوه من رواسب ونباتات .

ويكون سقوط الحطام **debris fall** مماثلا لسقوط الصخور ، ولكنه يتكون من خليط من الصخور والحطام الصخرى بالإضافة إلى النباتات .

2. الانزلاقات

الانزلاقات الأرضية landslides هى تحركات على سطح أو أكثر من أسطح الانهيار . وتكون أسطح الانزلاق مستوية تقريبا ومائلة ، مثل أسطح التطبق أو أسطح الصدوع أو الفواصل . ويسمى الانزلاق انزلاقا انتقاليا ، أما إذا كانت أسطح الانزلاق مقعرة سُمى الانزلاق انزلاقا دورانيا ، ويعرف أيضا بالتدهور .

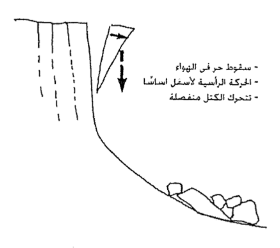
الانزلاقات الانتقالية translational slides:

ويشمل نوعين من الانزلاق (شكل 5.11 ب) هما الانزلاق الصخري**rockslide** وهو عبارة عن الحركة المفاجئة لكتلة صخرية منزوعة من الطبقات على المنحدرات ، وانزلاق الحطام **debris slide** وهو انزلاق الحطام الصخرى على أسطح المنحدرات . وينتشر الانزلاق الصخرى وانزلاق الحطام فى المناطق الجبلية المرتفعة حيث تنتشر الانحدارات الحادة . وعندما تحدث انهيارات صخرية ضخمة ، فإن الراسب الناتج يتكون عموما من خليط غير منتظم من كتل صخرية مخلوطة بجلاميد يصل قطرها أحيانا إلى عدة أمتار .

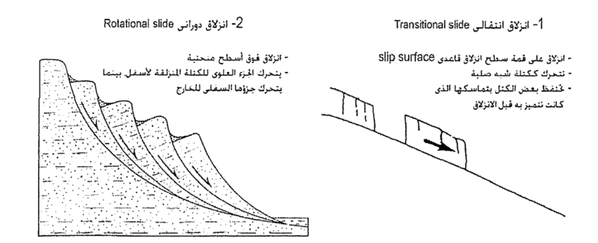
وتجَمّع الكسرات الصخرية المزواة هو منظر شائع عند سقوط الجروف الحادة . ويتراوح عادة حجم الحطام الصخرى بين حجم الرمل والجلاميد الكبيرة . ويسمى هذا الجسم من الحطام المنحدر للخارج عند أسفل الجروف والمنحدرات شديدة الميل **بالركام talus** .

ويمثل انهيار المنحدرات الجنوبية والجنوبية الغربية للهضبة العليا لجبل المقطم مثالا على الانزلاقات الانتقالية والسقوط الصخرى (شكل 6.11 أ) . وتتكون الهضبة العليا للمقطم من حجر جيرى يتبع الإيوسين العلوى ، ويحتوى على حفريات كبيرة وكثير من الفجوات الصغيرة ، بالإضافة إلى طبقات من حجر الطين تحتوى على معدنى المونتيموريلينيت والكاولينيت، وتقع مباشرة تحت صخور أساس bedrock مدينة المقطم . وقد حدث انهيار المنحدر فى

أ- السقـوط Falls



ب- الانزلاقات الارضية Landslides



شكل (5.11): تصنيف عمليات انهيار المنحدرات .

أ) السقوط falls وهو يشمل السقوط الصخرى rockfall وسقوط الحطام debris fall.

ب) الانزلاقات الأرضية landslides ، ويشمل

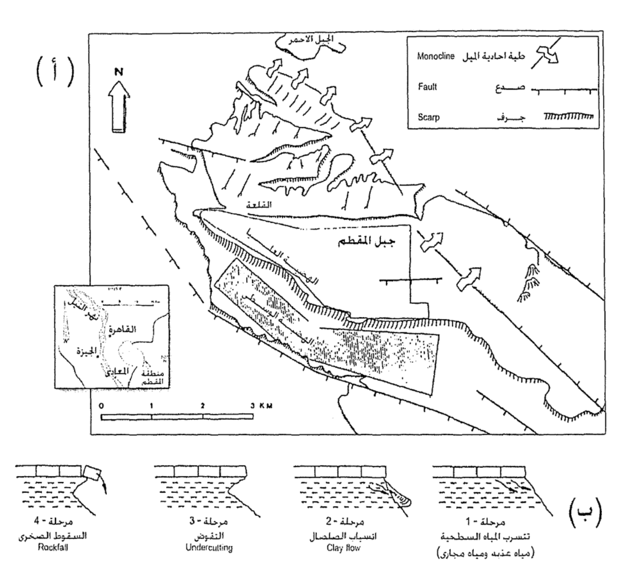
(1) الانزلاق الانتقالى transitional slide حين تتحرك الكتلة الهابطة على امتداد أسطح مستوية ومائلة .

(2) الانزلاق الدورانى rotational slide (التدهور slump) حين تتحرك الكتلة الهابطة على امتداد أسطح منحنية .

(Compiled from: Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston, and: Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

تلك المناطق بسبب الانزلاق الانتقالى لكتل كبيرة نزعت من الهضبة العليا ، ولوجود فواصل رأسية تتسرب فيها المياه العذبة ومياه مجارى مدينة المقطم ، والتى تعمل على انتفاخ طبقات حجر الطين (شكل 6.11 ب) .

التدهور **slump** وفيه تتحرك الصخور أو الحطام الصخرى لأسفل وللخارج فى حركة دورانية على سطح انزلاق يأخذ شكلا مقعرا لأعلى مثل الملعقة (شكل 5.11 ب). وتميل عادة قمة الكتلة المنزلقة للخلف لتكون منحدرا معاكسا . وقد يكون التدهور



شكل (**6.11**): انهيار المنحدرات الجنوبية والجنوبية الغربية للهضبة العليا لجبل المقطم .

أ)خريطة تضاريسية لجبل المقطم

ب) رسم تخطيطى يوضح مراحل انهيار حافة الهضبة العليا للمقطم وتراجعها ، حيث تغلغل الماء فى الرواسب الطينية على امتداد مستويات التطبق مما زاد فى معدل انزلاق الطبقات فوق بعضها ، كما أدت شدة انحدار الصخور إلى عدم استقرار حافة الهضبة العليا للمقطم .

(After Moustafa, A. R. and Abdel Tawab, S., 1985: Morphostuctures and non-tectonic structures of Gebel Mokattam. Mid. East Res. Center, Ain Shams Univ., Egypt, Sci. Ser. 5).

(After Moustafa, A. R., El-Nahhas, F. and Abdel Tawab, S., 1991: Engineering geology of Mokattam City and vicinity, eastern Greater Cairo, Egypt. Eng. Geology, Vol. 31).

مفردا أو فى مجموعات ، كما تتراوح التدهورات فى الحجم بين إزاحات صغيرة تبلغ مترا أو مترين إلى تدهورات كبيرة معقدة تغطى مئات أو حتى آلاف الأمتار المربعة .

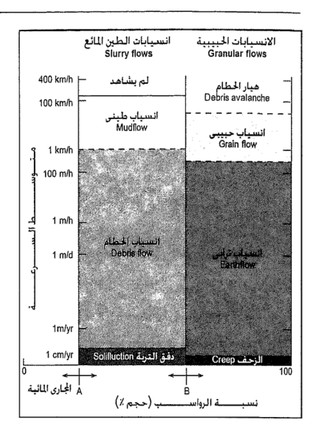
ويحدث عديد من التدهورات نتيجة لتعديل الشكل الهندسى لطوبوغرافية بعض المناطق أو أثناء إنشاء الطرق السريعة التى تسير بمحاذاة منحدرات الجبال . كما تلاحظ على جوانب الأنهار وشواطئ البحار حيث تعمل التيارات والأمواج على تقويض قاعدة المنحدر .

ب. انسيابات الرواسب

تعرف انسيابات الرواسب **sediment flows** بأنها تحرك كتلى يشبه تحرك السوائل. وتتكون المواد المنسابة من كتل كبيرة متماسكة فى حجم الجلاميد ، كما قد تكون فى حجم حبيبات الرمل أو الصلصال ، كما قد تتكون من خليط من كل تلك المواد . وتتفاوت كمية الماء فيها ، حيث تكون جافة أو رطبة أو مبتلة . وتتكون المواد المنسابة من مخاليط كثيفة من الرواسب والماء (أو من الراسب والماء والهواء) ، حيث يكون الانسياب معتمدا على الراسب فى حركته ، ولا يحدث انسياب فى حالة عدم وجود راسب . وقد تكون الانسيابات حبيبية أى تكون الحركة تحت ظروف جافة تقريبا . والخاصية العامة التى تشترك فيها كل تلك الانسيابات أن حبيبات الرواسب تتحرك جميعا تحت تأثير الجاذبية الأرضية . ففى حالة الانسيابات الحبيبية تعمل الحبيبات مثل الموائع نتيجة للضغط الناشئ عن تفاعل الحبيبات .

ويمكن تصنيف انسيابات الرواسب بناء على الطريقة التى تتحرك بها إلى: انسيابات موائع fluidal flows أو انسيابات مواد لدنة ، حيث يعرف الانسياب حينئذ بالانسياب الكتلى mass flow . ويمكن اعتبار هذين النوعين من انسيابات الرواسب أنهما يمثلان طرفى سلسلة متصلة من الانسيابات . ويحدد تركيز الرواسب وميكانيكية الانسياب نوع الانسياب الذى قد يحدث تحت ظروف معينة . وقد تتغير ميكانيكية انسياب ما خلال تقدمه . ومن المعروف أن معظم الكتل الضخمة من الرواسب التى تتحرك تحت تأثير الجاذبية الأرضية ، تتحرك بأكثر من ميكانيكية واحدة .

وتعتمد الطريقة التى تنساب بها الرواسب فى درجات حرارة أعلى من درجات التجمد على: (1) نسبة المواد الصلبة والماء والهواء و(2) الخصائص الفيزيائية والكيميائية للرواسب. ويوضح (شكل 7.11) تقسيم انسيابات الرواسب إلى مجموعتين اعتمادا على نسبة الراسب وهما (1) **انسياب الطين المائع slurry flow** وهو كتلة متحركة من راسب مشبع بالماء ، و (2) **انسياب حبيبى granular flow** وهو خليط من الراسب والهواء والماء ، ولكن على خلاف انسياب الطين المائع فإنه يكون غير مشبع بالماء ، حيث يعتمد وزن الراسب المنساب بالكامل على تلامس الحبيبات ببعضها البعض أو التصادم بين الحبيبات . وتشمل كلتا مجموعتى الانسياب السابقتين عدة أقسام بناء على سرعة انسياب الرواسب ، فالزحف creep وهو نوع من الانسياب الحبيبى البطىء جدا ، ويقاس بالمليمترات أو السنتيمترات كل عام ، بينما يقاس هيار الحطام debris avalanche بالكيلومترات فى الساعة. وفى هذا التصنيف للانسيابات الرسوبية ، فإن الحدود الموضوعية بين هذه العمليات تقريبية فقط وتعتمد على توزيع حجم الحبيبات وتركيز الراسب وعوامل أخرى. وفيما يلى وصف لأنواع الانسيابات الرسوبية .



شكل (7.11): تقسيم انسيابات الراسب اعتمادا على نسبة الرواسب وسرعتها. ويحدث الانتقال من مجرى مائى محمل بالرواسب إلى انسياب الطين المائع عندما تصبح نسبة الرواسب عالية لدرجة أن المجرى المائى لايمثل عامل نقل، وإنما تصبح الجاذبية الأرضية هى القوة الأولى التى تعمل على انسياب الرواسب المشبعة بالماء. وعندما تقل نسبة الماء، يحدث انتقال من انسياب طين مائع إلى انسياب حبيبى، حيث يحتوى الراسب حينئذ على الماء أو الهواء. وتحدّد الأنواع المختلفة من انسيابات الطين المائع أو الانسيابات الحبيبية اعتمادا على متوسط السرعة.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

1. انسيابات الطين المائع (الردغة)

يكون خليط الراسب فى انسيابات الطين المائع كثيفا إلى درجة أن الجلاميد الكبيرة قد تصبح معلّقة فيها، وتنساب بالدحرجة، وعندما يتوقف الانسياب تبقى الحبيبات الناعمة والخشنة مختلطة ببعضها.

دفق التربة: تعرف الحركة البطيئة جدا للتربة والحطام الصخرى (الأديم) regolith المشبع بالماء أسفل المنحدرات بدفق التربة solifluction وتحدث هذه الحركة فى المناطق التى يزيد ارتفاعها عن خط الثلج الدائم، حيث يتجمد الحطام الصخرى القريب من السطح بصفة دائمة، وقد يمتد التجمد إلى أعماق تصل إلى 400 متر، ويطلق عليه اسم الصقيع الدائم permafrost، وتعلوه طبقة رقيقة ينصهر فيها الجليد فى الصيف ويتجمد فى الشتاء، وعند انصهار الجليد فى الصيف تصبح هذه الطبقة السطحية مشبعة بالماء الذى لايتسرب منها إلى أسفل لوجود الجمد الدائم تحته، ويؤدى ذلك إلى عدم استقرار هذه الطبقة السطحية وانسيابها أو زحفها فى اتجاه ميل السطح (شكل 7.11).

انسياب الحطام: يشمل انسياب الحطام debris flow تحرك حطام صخرى غير متماسك إلى أسفل المنحدرات، حيث يكون حجم معظم الحبيبات أكبر من حجم الرمل، وتتحرك بسرعات تتراوح بين متر واحد فقط فى العام إلى أكثر من كيلومتر واحد فى الساعة. وفى بعض الأحيان، يبدأ انسياب الحطام بتدهور أو انزلاق الحطام، ثم يستمر الجزء السفلى منه فى الانسياب لأسفل المنحدرات (شكل 8.11). وبمجرد بدء انسياب الحطام، فإنه يتحرك على امتداد مجرى مائى ثم ينتشر على سطح مروحة طمية حيث يتماسك كراسب ردىء الفرز.

ويكون لرواسب انسياب الحطام مقدمة على شكل لسان، كما يكون سطحها غير منتظم بالمرة، مع وجود مرتفعات صغيرة (حيود) ومنخفضات متحدة المركز. ويصاحب انسيابات الحطام عادة فترات سقوط أمطار شديدة للغاية، مما يؤدى إلى أن تصبح الأرض مشبعة بالماء بدرجة كبيرة.

انسياب طينى: يعرف انسياب الحطام الذى يكون محتواه من الماء يكفى لزيادة ميوعته بدرجة عالية بانسياب طينى mudflow ـ بمعنى أن مصطلح

Sediment flows انسيابات الرواسب

Slurry flows (رطبة) انسيابات الطين المائع

فرش دفق التربة
Solifluction sheets
ألسنة دفق التربة
Solifluction lobes
جهود وحزوز متحدة المركز

دفق التربة
Solifluction

انسياب الحطام
Debris flow

انسياب طينى
Mudflow

Granular flows (جافة) الانسيابات الحبيبية

غطاء صخرى
Regolith

1–10 km

الزحف
Creep

انسياب ترابى
Earthflow

هيار الحطام
Debris avalanche

شكل (8.11): انسيابات الرواسب وأمثلة على الانسيابات الحبيبية وانسيابات الطين المائع.
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الانسياب الطينى مرادف لانسياب حطام سريع الحركة. ويوضح (شكل 7.11) أن مدى سرعة الانسياب الطينى يقع عند الحد الأعلى لمدى سرعة انسياب الحطام (أكثر من 1 كيلو متر فى الساعة تقريباً). وعموما فإن معظم الانسيابات الطينية تكون سريعة الحركة وتميل لأن تتحرك بسرعة على امتداد قاع الوادى (شكل 8.11).

وإذا فحصنا رواسب الانسياب الطينى، فسنجد أن محتواها يتراوح بين خليط غليظ القوام مثل الأسمنت حديث الصب إلى خليط رقيق القوام أكثف قليلا من الماء المحتوى على كثير من الطين. فبعد سقوط الأمطار بغزارة على أخدود خانق فى منطقة جبلية، فإن الانسياب الطينى يبدى على هيئة مجرى مائى طينى يستمر فى التقاط الرواسب المفككة حتى تصبح مقدمته مثل سد متحرك من الطين والدبش rubble، وممتدا إلى

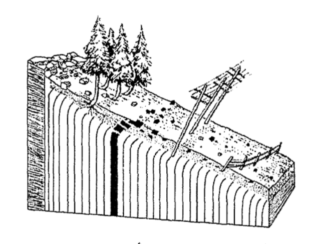
جانبى الوادى ومندفعا بقوة الماء المنساب وراءه . وعند الوصول إلى منطقة مفتوحة عند مقدمة الجبل ، فإن السد المتحرك ينهار ويصب الماء وينساب فوق السد المنهار وحوله ، وينتشر الطين المختلط بالجلاميد على هيئة فريشة رقيقة تأخذ أحيانا شكل المروحة .

وفى المناطق ذات المناخ الرطب ، حيث تتغطى جوانب البراكين النشطة شديدة الانحدار بطبقات التيفرا (الفتات النارى pyroctasts غير المتماسك المتكون من مواد صلبه بركانية من اللابة الحية نفسها ، بالإضافة إلى البركانيات السابقة الخروج) والحطام البركانى ، فى أعقاب سقوط أمطار أو ذوبان جليد تندفع هذه المكونات على هيئة انسياب طينى من حطام بركانى غير متماسك يحتوى على الماء ، وتعرف **باللاهار lahar** وهى كلمة معربة من الإندونيسية، ومن أمثلة ذلك ما سبق أن أوضحناه فى أرميرو بكولومبيا.

2. الانسيابات الحبيبية

تكون الرواسب فى الانسيابات الحبيبية جافة إلى حد كبير، مع وجود هواء يملأ الفراغات ، كما قد تكون مشبعة بالماء ولكن يسمح حجم الحبيبات وشكلها للماء بالهروب بسهولة .

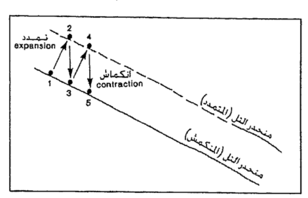
الزحف والكولوفيوم: إن أبطأ تحرك كتلى هو المعروف **بالزحف creep** ، حيث تحدث حركة بطيئة غير محسوسة للغطاء الصخرى لأسفل التلال بمعدل يتراوح بين 1 مم إلى 10 سم تقريبا فى السنة ؛ تبعا لنوع التربة والمناخ وشدة الانحدار وكثافة النباتات الموجودة به. ويحدث الزحف عموما بمعدلات بطيئة جدا لدرجة لا يمكن ملاحظتها ، إذ إن القياسات الدقيقة لإزاحة الأجسام على المنحدرات مثل أعمدة الهاتف والأشجار تسجل هذه المعدلات البطيئة (شكل 9.11) . وكما هو متوقع فإن معدلات الزحف تكون أعلى على المنحدرات الحادة أكثر منها على المنحدرات اللطيفة . وهناك عديد من الأسباب التى تؤدى إلى الزحف، مثل تكون الجليد وذوبانه مما يسبب ارتفاع وهبوط الحبيبات (شكل10.11) ، وكذلك قد يتغير حجم حبيبات المعدن بسبب ارتفاع وانخفاض درجات الحرارة دون أن يحدث تجمد . كما يؤثر النشاط الحيوانى فى عملية الزحف ، حيث تعمل الديدان والحشرات والحيوانات الزاحفة الأخرى على إزاحة الحبيبات ، كما تفعل الحيوانات على سطح الأرض حاليا . وكذلك عندما تذوب بعض المعادن فى الماء ، فإنها تترك فراغات فى صخر الأساس ، حيث يكون هناك ميل لأن تملأ بالمواد من أعلى المنحدرات .



شكل (9.11): شكل لمنحدر يوضح تأثير الزحف creep ، حيث تتحرك التربة ببطء . وقد تشوهت الطبقات المائلة بشدة بالقرب من سطح الأرض بحيث تبدو كما لو أنها طويت ، كم مالت أعمدة الهاتف وتأثر السور وانحنت جذوع الأشجار نتيجة للزحف .
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

وتسمى الرواسب غير المتماسكة والتى تتحرك أساسا نتيجة الزحف على المنحدرات **بالكولوفيوم (رسوبيات متراكمة) colluvium**. وتميل الحبيبات فى هذه الرواسب لأن تكون مزواة وينقصها الفرز sorting الواضح . وتساعد هذه الصفات عموما فى التمييز بين الكولوفيوم والرواسب المتكونة بواسطة

المياه المنسابة أو الهواء ، والتى تتكون عادة من حبيبات مستديرة وترسبت فى طبقات قد تم فرزها .



شكل (10.11): رسم توضيحى لكيفية حدوث الزحف creep ، نتيجة لدورة التجمد – الانصهار freeze-thaw cycle . تتحرك الحبيبات لأسفل على المنحدرات نتيجة لتبادل عمليتى تجمد وذوبان الجليد على الأرض . فعندما يحدث التجمد ، ترتفع الحبيبة عن سطح الأرض (من نقطة 1 إلى نقطة 2) ، وعندما يذوب الجليد تتحرك الحبيبة رأسيا تقريبا لأسفل نتيجة تأثير الجاذبية (من نقطة 2 إلى نقطة 3) ؛ مما يؤدى إلى تحرك الحبيبة لمسافة قصيرة، ولكنها هامة ، أسفل المنحدرات .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

الانسيابات الترابية: الانسياب الترابى earthflow

هو أحد معالم الانهيال الكتلى الشائعة وخاصة فى المناطق الجبلية ، وهو انسياب حبيبى تتراوح سرعته بين متر واحد فى اليوم إلى عدة مئات من الأمتار فى الساعة (شكل 7.11) . وقد تبقى الانسيابات الترابية نشيطة لعدة أيام أو شهور أو حتى سنوات . وقد تكون عرضة للتحرك مرة أخرى بعد توقف الحركة لبعض الوقت . وتتكون الانسيابات الترابية عموما ، مثل انسيابات الحطام ، من غطاء صخرى فى حجم حبيبات الغرين أو الصلصال تم تجويته ، ويحدث على منحدرات تتراوح بين اللطيفة والمتوسطة (°2 إلى °35) . وتحدث الانسيابات الترابية حينما تكون الأرض مشبعة بالماء ، على فترات متقطعة على الأقل. وعموما تصاحب الانسيابات الترابية فترات من سقوط الأمطار الشديدة.

ويأخذ الانسياب الترابى شكل اللسان الطويل الضيق ، وتكون له مقدمة مستديرة ومنتفخة . وتتراوح الانسيابات الترابية بين عدة أمتار طولا وعرضا ، وأقل من متر واحد عمقا ، إلى أكثر من عدة مئات من الأمتار عرضا، وأكثر من 1 كم طولا ، وأكثر من 10 متر عمقا.

الانسياب الحبيبى: إذا مشى شخص على قمة أحد الكثبان الرملية واقترب جدا من المنحدر الحاد الذى يقع فى الناحية المدابرة لاتجاه الريح ، فإن خطوة هذا الشخص تكون قد تسببت فى بدء سقوط حبيبات الرمل منسابة أسفل وجه الكثيب الرملى . ويشرح هذا المثال ، أحد أنواع الانهيال الكتلى والمعروف بالانسياب الحبيبى granular flow والتى تشمل تحرك راسب جاف أو شبه جاف مكون من حبيبات مع وجود هواء يملأ الفراغات المسامية بينها . ويحدث مثل هذا الانسياب الحبيبى طبيعياً ، عندما تكوِّن حبيبات الرمل المتراكمة انحدارا يزيد عن زاوية الاستقرار، مما يؤدى إلى حدوث انهيار. وتتصادم الحبيبات المتحركة خلال عملية الانسياب بكثرة . ويتراوح معدل سرعات الراسب المتحرك نموذجياً بين 0.1 إلى 35 متر فى الثانية.

هيارات الحطام: يكون هيار الحطام **debris avalanche** الضخم والمتحرك بسرعة حدثا نادرا ومثيرا . ويتحرك هذا النوع من الانسياب الحبيبى بسرعة عالية ، وقد يكون شديد التدمير (شكل 8.11). وكثيرا ما يتضمن هيار الحطام كتلا ضخمة من الصخر المتساقط والحطام الذى يتكسر ويسحق عند ارتطامه ، ثم يستمر فى الحركة أسفل المنحدرات لمسافات كبيرة غالبا .

ويكون لسقوط الصخور الضخمة والذى يؤدى لحدوث هيارات الحطام أكبر تأثير على الإنسان فى المناطق الجبلية المأهولة بالسكان مثل جبال الألب

والأنديز . فلقد حدث فى سبتمبر عام 1717 م أن سقطت كتلة ضخمة من الصخر والجليد على مثلجة تريوليه Triolet Glacier من قمة جبل قرب مون بلان Mont Blanc على امتداد الحدود الإيطالية الفرنسية ، مما أدى إلى طحنها عند الاصطدام . ولقد تحرك الحطام المتكسر بسرعة لأسفل وعلى امتداد الوادى ولمسافة 7 كم قبل أن تتوقف مقدمته ، وعلى ارتفاع أقل 1860 مترا من مكان انفصال تلك الكتلة . وقد قدرت سرعة الكتلة عند الاصطدام بحوالى 320 كم فى الساعة . وعند اصطدام كتلة الحطام بأرض الوادى الرئيسى ، فإن القوة الدافعة حملتها إلى أعلى جدار للوادى المقابل إلى ارتفاع بلغ 60 مترا على الأقل . وقد غمر الحطام عند هذه النقطة قريتين صغيرتين بالجبل وقتل كل السكان والدواب ، حيث قدرت سرعة الهيار بحوالى 125 كم / ساعة على الأقل . وقد استغرق الزمن الكلى لرحلة الهيار على امتداد السبع كيلو مترات بين دقيقتين وأربع دقائق . ومن الواضح من زمن هذه الحركة السريعة أن النجاة من هيارات الحطام الكبيرة والمدمرة تكون نادرة الحدوث .

وحيث إن هيارات الحطام الكبيرة نادرة الحدوث ومن الصعب دراستها أثناء الحركة ، فتكون نتائج ملاحظتها قليلة . وتعزى الحركة الشديدة السرعة إلى أن الحطام كان يعلو طبقة من الهواء المضغوط . فإذا كانت هذه الملحوظة صحيحة ، فإن هيارات الحطام تتحرك مثل المركبات التى تجرى على اليابس أو الماء فوق هواء مضغوط يخرج من مروحة كبيرة . وقد يقلل الهواء المضغوط بين الحطام المتحرك من الاحتكاك بين الجزئيات ويسبب أن تتصرف الكتلة مثل مادة عالية الميوعة . وتتعرض جوانب البراكين الطباقية غير المستقرة للانهيار مما يؤدى إلى حدوث هيارات حطام.

ج. الانهيال الكتلى فى المناخات الباردة

ينشط الانهيال الكتلى بصورة ملحوظة عند الارتفاعات العالية فوق خط الثلج الدائم وفى المناطق شديدة البرودة عند خطوط العرض العالية . وفى هذه المناطق يغطى الثلج معظم صفحة الأرض طوال العام بأرضية متجمدة ويكون تأثير الصقيع مهمًّا كعملية جيولوجية.

1. الانتفاخ الصقيعى والزحف

عندما يتجمد الماء يزداد حجمه ويدفع الجليد الموجود فى الغطاء الصخرى المشبع بالماء سطح الأرض إلى أعلى . ويسمى رفع الغطاء الصخرى لأعلى نتيجة لتجمد الماء بالانتفاخ الصقيعى **frost heaving** . ويؤثر الانتفاخ الصقيعى كثيرا على زحف الرواسب إلى أسفل المنحدرات فى المناخات الباردة . وعند حدوث التجمد يرتفع سطح الأرض فى اتجاه عمودى على المنحدر. وعند ذوبان الجليد ، تميل كل حبة من الرواسب لأن تسقط رأسيا لأسفل تحت تأثير الجاذبية . وهكذا تكون حركة الحبيبة النهائية خلال كل دورة من التجمد والانصهار ، لمسافة قصيرة جدا لأسفل على المنحدر (شكل 10.11) . والنتيجة النهائية لهذه الدورات المتكررة من التجمد والانصهار هى الزحف creep ولكن ببطء لأسفل على المنحدرات .

2. المثالج الصخرية

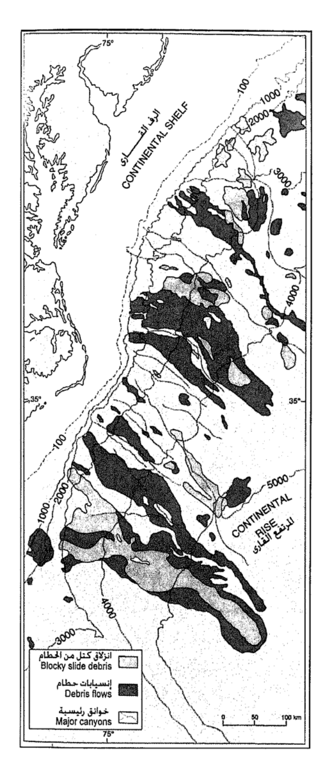
تعتبر المثلجة الصخرية**rock glacier** إحدى المعالم المميزة لعديد من المناطق الجبلية الجافة . وهى عبارة عن لسان من حطام صخرى رديء الفرز ملتحم بالجليد ، يتحرك ببطيء لأسفل على المنحدرات بطريقة مشابهة للمثالج . وتنشأ المثالج الصخرية عموما أسفل الجروف الحادة والشديدة الانحدار والتى تعتبر مصدرا للحطام الصخرى. وقد يصل سمك المثلجة الصخرية النشيطة حوالى 50 مترا أو أكثر ، وقد تتحرك بمعدلات

تصل إلى حوالى خمسة أمتار فى العام . وتكون المثالج الصخرية شائعة عموما فى سلاسل الجبال المرتفعة مثل جبال الألب والأنديز.

د. الانهيال الكتلى تحت الماء

امتد البحث عن النفط إلى الرفوف والمنحدرات القارية . وقد أوضحت عمليات الاستكشاف البترولى أن الانهيال الكتلى تحت الماء subaqueous mass wasting شائع إلى أبعد الحدود ، وأنه أحد العوامل المهمة لنقل الرواسب على قاع المحيط ، كما اكتشف أيضا وجود انهيال كتلى فى البحيرات . وكما هو الوضع على اليابس ، فإن الصخور والرواسب تتحرك تحت تأثير الجاذبية كلما كان هناك منحدرات تحت مائية . وتؤدى انهيارات المنحدرات تحت الماء إلى تكون تيارات كثيفة تنساب فى أعماق البحار ، وتتحرك تحت تأثير الجاذبية، وتعرف بتيارات العكر turbidity currents. وتيارات العكر هى نوع من انسياب الرسوبيات تحت الماء ، حيث تتحرك الرواسب فى الوديان العميقة ذات الجوانب شديدة الانحدار والمعروفة بالأخاديد الخانقة canyons تحت البحرية ، حيث تتكون رواسب العكر على مناطق المرتفع القارى continental rise . كما قد يتسبب الانهيال الكتلى تحت الماء فى تكون جزء أساسى من رواسب الرف القارى continental shelf خاصة فى المناطق القريبة من الأنهار الكبيرة .

وقد أظهرت الدراسات الحديثة للمحيط الأطلنطى شرق أمريكا الشمالية ، أن مساحات واسعة من قاع المحيط قد تعرضت لتدهورات وانزلاقات وانسيابات تحت بحرية (شكل 11.11) . وقد غطت بعض الانزلاقات الكبيرة مساحات تبلغ أكثر من 40000 كم^2، وتصل إلى أعماق تزيد عن 5400 متر. وتؤثر الانزلاقات عموما فى الخمسين مترا العليا من رواسب قاع المحيط .



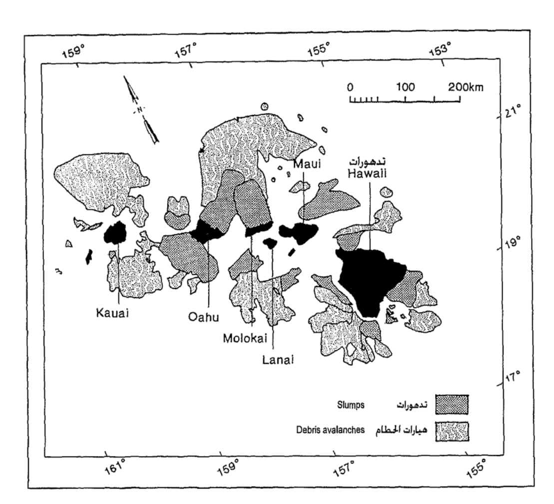
شكل (11.11): خريطة للمنطقة الشرقية من الولايات المتحدة الأمريكية توضح توزيع الانزلاقات الأرضية ورواسب انسياب الحطام على المنحدر والمرتفع القارى continental slope and rise للمحيط الأطلنطى .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

كما تتكون فى الدلتاوات البحرية الكبيرة عدة مظاهر سطحية ورواسب ترجع إلى انهيارات المنحدرات. ففى مثل هذه البيئيات تحت المائية قد يحدث الانهيار على منحدرات لطيفة جدا (فى حدود 1°)، ومن أمثلة ذلك دلتا المسيسبى. وعموما فإن الانزلاقات وانسيابات الرواسب تكون نشيطة للغاية عند مقدمة الدلتا.

III. الانهيال الكتلى وتكتونية الألواح

يوضح إسقاط الانهيارات الأرضية الكبيرة فى العالم على خريطة الكرة الأرضية، أن معظمها يتركز فى أحزمة تقع بالقرب من حدود الألواح المتقاربة. ويرجع ذلك إلى سببين:



شكل (12.11): تغطى جزر هاواى (موضحة باللون الأسود) مساحة أقل من المساحات التى يشغلها تدهورات وهيارات الحطام الساقطة منها.

(After Abbott. P. L.. 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill. Boston).

وتظهر طوبوغرافية الحواف السفلية المغمورة لبراكين هاواى (شكل 12.11)، حدوث انهيارات أرضية ضخمة متكررة على جوانب البراكين، وتشمل انسيابات وانزلاقات للركام على هيئة كتل.

1. تقع أعلى سلاسل الجبال فى العالم عند حدود الألواح المتقاربة أو بالقرب منها، حيث تتميز هذه الجبال بالمنحدرات الحادة، مثل جبال الأنديز بأمريكا الجنوبية. وتتكون معظم صخور هذه السلاسل الجبلية من طبقات بها عديد من الفواصل

والتى تكسرت بشدة وتشوهت أثناء رفعها ، بحيث تكون كل مـن أسـطح الفواصـل وأسـطح التطبـق نطاقات محتملة للانهيار . وبالإضافة إلى ذلك ، تقـع عـلى امتـداد الحـدود المتقاربـة وعـلى امتـداد هـذه الأحزمة أعلى البراكين الطباقية فى العالم ، والتى تميل منحـدراتها بزوايـا حـادة، حيـث يتواجـد الرمـاد البركـانى الـذى تنـشأ عنـه الانـسيابات الطينيـة بسهولة.

2. تحـدث أيـضا عـلى امتـداد هـذه الألـواح المتقاربـة زلازل كبيرة ، حيث تنزلق حدود الألـواح بالـنسبة لبعضها البعض فى نطاقات الاندسـاس ، كـما تنـشأ أيضا الزلازل مصاحبة للصهارات المتحركـة لأعـلى التى تغذى الانبثاقات البركانية على سطح الأرض .

وقد تـصاحب التحركـات الكتليـة أيـضا الألـواح المتباعدة ، خاصـة عنـد المنحـدرات الحـادة المتكونـة فى وديـان الخـسف القاريـة والتـى تـصاحب بـدء عمليـة التباعد . وقد حـدثت انهيـارات تحـت بحريـة فى وادى الخسف فى حيد وسط المحيط الأطلنطى ، وهو موضـع لتباعد الألواح أيضا . كـما أن حـدود الـصدع الناقـل ، مثل صدع سان أندرياس ، هى أيضا مواقع لتحركـات كتلية متكررة ، حيث تنشأ المنحدرات الحادة على امتداد الصدع ويكثر حدوث الزلازل . وعند مقارنة الظروف السابقة مع المناطق البعيدة عـن حـدود الألـواح سـواء الحالية أو السابقة ، حيث تكون الطوبوغرافية منخفضة نسبيا، فإن تشوه الـصخور يكـون أقـل نـسبياً وتكـون المنحدرات الطبيعية والزلازل نادرة .

IV. تجنب أو تخفيف آثار الانهيال الكتلى

قـد تكـون بعـض التحركـات الكتليـة كبـيرة أو لا يمكن تجنبها ، ولذلك يجب أن نتعلم كيـف نتعـايش معها ونتجنب آثارها أو منعها خاصة الـصغير منهـا أو التى تحدث نتيجة النشاط الإنـسانى . وتـشمل الطـرق الرئيسية لإعادة الاستقرار إلى بعـض المنـاطق المعرضـة للانهيارات الأرضية :(1) تجنب الإنشاءات فى المنـاطق المعرضة للتحركات الأرضية ، (2) تجنب إنشاء الجسور (الكبارى) فوق المناطق غير المستقرة ، (3) صرف المياه أو ضخها من الرواسب المشبعة بالمياه عـلى المنحـدرات المعرضـة للزحـف ، (4) إنـشاء حـوائط حـاجزة أو تراكيب مماثلة مع مراعاة ألا تقوم هذه الحـوائط بحجـز الماء أيضا، (5) محاولة تعديل زاوية الانحـدار وجعلهـا مساوية لزاوية الاستقرار الطبيعيـة ،(6) يمكـن أحيانـا حقن الأسمنت أو استخدام النسف بالمتفجرات لجعـل المنحدرات أكثر استقراراً.

الملخص

1. يسبب الانهيال الكتلى تحرك الحطام الصخرى تحـت تأثير الجاذبيـة دون وسـط نقـل. ويحـدث الانهيـال الكتلى على اليابس وتحت الماء.
2. تؤثر كل من طبيعـة وتركيـب الحطـام وكميـة المـاء والهواء المختلط به ودرجة ميـل المنحـدر عـلى نـوع وسرعة التحركات على المنحدرات .
3. تـشمل عمليـات الانهيـال الكـتلى انهيـار المنحـدر المفـاجئ ممثلـة بالتـدهور والـسقوط والانـزلاق، وكذلك انسياب مخاليط من الرواسب والماء والهـواء لأسفل المنحدرات .
4. تحدث الانهيارات حينما يصل إجهاد القـص (القـوة الدافعة) أو يزيد عن قوة القص (قوة المقاومة) لمواد المنحدر . ويقلل ضـغط المـاء العـالى فى منحـدرات الـصخر أو الراسـب مـن قـوة القـص ويزيـد مـن احتمالية الانهيار.

5. يتضمن التدهور حركة دورانية على سطح انزلاق مقعر لأعلى ؛ مما يؤدى فى حدوث ميل للخلف لكتل الصخر أو الغلاف الصخرى.

6. يشيع سقوط وانزلاق كتل الصخر والحطام فى الجبال حيث ينتشر وجود المنحدرات الحادة.

7. يتراكم حطام سقوط الصخور عند قاعدة الجرف ليكون ركاما يتجمع عند زاوية الاستقرار.

8. تشمل انسيابات الطين المائع كتلا كثيفة متحركة من راسب مشبع بالماء وتكون عند توقف الانسياب غير مفروزة . وتتراوح سرعة الانسياب بين سرعة بطيئة جدا (دفق التربة) إلى سرعة عالية (انسيابات الحطام).

9. فى الانسيابات الحبيبية توجد حدود تلامس بين الحبيبات المكونة للراسب أو تتصادم الحبيبات باستمرار. وقد يكون الراسب جافًا إلى درجة كبيرة أو قد يكون مشبعًا بالماء ولكن يسمح النسيج بهروب الماء بسهولة .

10. على الرغم من أن الزحف يكون بطيئا لدرجة غير محسوسة ، إلا أنه واسع الانتشار ومهم فى نقل كميات من الحطام لأسفل المنحدرات .

11. تكون هيارات الحطام الكبيرة وسريعة الحركة نادرة ولكن تسبب كوارث للإنسانية .

12. فى المناطق التى تكون الأرض فيها متجمدة طول السنة ، يكون الانتفاخ بفعل الصقيع والزحف هما أهم عمليات الانهيال الكتلى.

13. هناك أدلة على انتشار عمليات التدهور والانزلاق والانسياب على المنحدرات القارية على مساحات واسعة من قاع المحيط .

14. يمكن تخفيف آثار الانهيارات الكتلية أو منعها بالتخطيط والتقييم الدقيق المبنى على دراسات جيولوجية لمناطق سابقة .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://anaheim-landslide.com/
http://www.seis.utah.edu/NEHRP_HTM/perseq.htm
http://landslides.usgs.gov/
http://landslides.usgs.gov/slumtrip/slumtrip.htm

المصطلحات المهمة

angle of repose	زاوية الاستقرار	rockfall	سقوط صخرى
colluvium	كولوفيوم (رسوبيات متراكمة)	rock glacier	مثلجة صخرية
consolidated materials	مواد متماسكة	rockslide	انزلاق صخرى
creep	زحف	rock avalanche	هيار صخرى
debris avalanche	هُيَار الحطام	sediment flows	انسيابات الراسب
debris fall	سقوط الحطام	shear strength	قوة القص
debris flow	انسياب الحطام	shear stress	إجهاد القص
debris slide	انزلاق الحطام	slump	تدهور
earthflow	انسياب ترابى	slurry flow	انسياب الطين المائع
frost heaving	انتفاخ بفعل الصقيع	solifluction	دفق التربة
granular flow	انسياب حبيبى	surface tension	توتر سطحى
lahar	لاهار (انسياب الطين البركانى)	talus	ركام
landslide	انزلاق أرضى	turbidites	رواسب العكر
mass movement	تحرك كتلى	turbidity currents	تيارات العكر
mass wasting	انهيال كتلى	unconsolidated materials	مـــواد غــير متماســكة (مفككة)
mudflow	انسياب طينى		

الأسئلة

1- ما دور الزلازل فى حدوث الانهيارات الأرضية ؟

2- اذكر كيف يختلف الانهيال الكتلى عن التجوية وعن التعرية بواسطة المجارى المائية.

3- اذكر كيف ينشط وجود الماء فى الصخر أو الحطام الصخرى (الأديم) الحركة لأسفل على المنحدرات.

4- ماالفرق بين الانزلاق والانسياب ؟

5- ماأنواع التحركات الكتلية التى تتم بسرعة بحيث لايستطيع الشخص تجنبها؟

6- كيف تؤثر شدة الانحدار على الانهيال الكتلى؟

7- اذكر الفرق بين كل من السقوط الصخرى والانهيار الصخرى.

8- كيف تثبت أن هناك زحفا يحدث على المنحدر وكيف يمكن قياس سرعته؟

9- ماالسبب فى أن هيار الركام الكبير واللاهار (انسياب الطين البركانى) تكون عموماً أخطر بكثير على السكان من انسيابات اللابة ؟

10- كيف يمكن أن تؤثر الأمطار الغزيرة والمستمرة على قوة القص لجسم من الغلاف الصخرى وتجعله عرضة للانهيار؟ .

11- ما الانسياب الطينى ، وكيف يمكن أن يتكون ؟

الفصل 12

دورة الماء والأنهار

أولا: الانسيابات وخزانات المياه

I. دورة الماء

II. كمية الماء المستخدم

ثانيا: الأنهار والنقل إلى المحيطات

I. المعالم الرئيسية للنظام النهرى

أ. نظام التجميع

ب. نظام النقل

جـ. نظام التوزيع (الانتشار)

II. انسياب الماء فى مجارى المياه الطبيعية

أ. التصريف

ب. السرعة التى يتحرك بها الماء

جـ. شكل وحجم قناة المجرى المائى

د. انحدار قناة المجرى المائى

هـ. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)

و. الحمولة

III. أشكال القنوات النهرية

أ. القنوات المستقيمة

ب. القنوات المنعطفة

جـ. القنوات المجدولة أو المضفرة

IV. التعرية بالمجارى المائية

أ. البرى

ب. التجوية الكيميائية والطبيعية

جـ. التقويض الناشىء عن تأثير التيار

V. حمولة المجارى المائية

أ. حمولة القاع

ب. الحمولة المعلقة

جـ. الحمولة الذائبة

د. التغير فى حجم الحبيبات وتركيب الرواسب فى اتجاه مصب النهر

VI. رواسب المجاريالمائية

أ. السهول الفيضية والجسور الطبيعية

ب. الشرفات (ألمصاطب النهرية)

جـ. المراوح الطميية (الفيضية)

د. الدلتاوات

VII. أنظمة الصرف

أ. أحواض الصرف وخطوط تقسيم المياه

ب. أنماط الصرف

جـ. أنماط الصرف والتاريخ الجيولوجى

VIII. نهر النيل بمصر

أ. نشأة وتطور نهر النيل

ب. تطور دلتا النيل

يقوم الجيولوجيون المتخصصون فى علم المياه بدراسة حركة المياه وخصائصها ، سواء الموجودة على سطح الأرض أوالمخزونة بداخلها. ويعتبر الماء الجارى فى الأنهار، وأيضا المتجمد فى جليد المثالج عامل رئيسى فى التعرية التى تساعد فى تشكيل صفحة الأرض على القارات. كما أن الماء عامل أساسى فى التجوية، حيث يعمل كعامل إذابة ونقل للمعادن الموجودة فى الصخور والتربة. كما يتسرب الماء فى صخور القشرة الأرضية ويكوّن خزانات مائية ضخمة. ويسبب الماء أيضاً كثيرا من الانزلاقات الأرضية وغيرها من صور التحرك الكتلى. وتتكون رواسب الخامات الحرمائية hydrothermal ore deposits نتيجة دوران الماء الساخن فوق الأجسام النارية وفى حيود وسط المحيط mid-ocean ridges.

والماء عامل حيوى وأساسى لكل صور الحياة على الأرض . ولا يستطيع الإنسان البقاء على قيد الحياة لأكثر من عدة أيام دون ماء . وحتى النباتات والحيوانات الصحراوية تحتاج إلى الماء . وكمية الماء التى تحتاجها المدنية الحديثة أكبر بكثير مما تحتاجه المتطلبات البسيطة للحياة ؛ فالماء يستخدم بكميات ضخمة فى الصناعة والزراعة واحتياجات المدن .

وقد أصبح علم المياه (الهيدرولوجيا) **hydrology** أكثر أهمية الآن ، حيث يتزايد الطلب على الماء رغم الكميات المحدودة المتاحة منه . ولكى نحمى هذه الإمدادات فلابد أن نفهم ليس فقط أين يمكن أن يتواجد الماء ؟ ولكن كيف يمكن أن نجدد مصادر وإمدادات المياه. ويمكننا فى ضوء هذه المعلومات أن نستخدم الماء ، دون أن نعرض تلك الإمدادات المستقبلية للخطر.

أولا : الانسيابات وخزانات المياه

نشاهد الماء الجارى وهو ينتقل من مكان لآخر فوق سطح الأرض عبر الأنهار ، كما يوجد مخزون من الماء على سطح الأرض فى البحيرات والمحيطات . ولكن من الصعب رؤية الكميات الضخمة من المياه المخزونة فى الغلاف الجوى للأرض ، أو تلك التى توجد تحت الأرض . كما يصعب أيضا مشاهدة الانسيابات داخل تلك الخزانات أو خارجها . فعندما يتبخر الماء ، فإنه يختفى عن النظر على هيئة بخار فى الغلاف الجوى . وعندما يغوص ماء المطر فى باطن الأرض ، فإنه يصبح ماءً جوفيا **groundwater** ، وهو كتلة من الماء المخزون تحت سطح الأرض ، ويسمى أيضاً ماء تحت أرضى **underground water** .

وتسمى كل البيئات التى يخزّن فيها الماء خزانات **reservoirs** . ويطلق مصطلح خزان على مصدر الماء أو مكان تواجده . ومن المواضع الطبيعية الرئيسية لتخزين الماء البحار والمحيطات والمثالج glaciers القطبى والبحيرات والأنهار والغلاف الجوى والغلاف الحيوى . ويوضح شكل (1.12) توزيع الماء بين تلك الخزانات . وتشمل الخزانات الأرضية البحيرات والأنهار والمياه الجوفية ، بينما تعتبر المحيطات أكبر خزانات الماء على الأرض . وعلى الرغم من أن كمية الماء الكلية فى الأنهار والبحيرات صغيرة نسبيا ، إلا أن هذه الخزانات مهمة للإنسان ، لأنها تحتوى على الماء الطبيعى الجاهز للاستخدام . وتبلغ كمية المياه الجوفية

مائة ضعف كمية المياه الموجودة فى الأنهار والبحيرات ، إلا أن الكثير منها لا يستخدم نظراً لأن مياهها تحتوى على كميات كبيرة من المواد الذائبة .

ويتدفق الماء إلى الخزانات من عدة مصادر منها الأمطار والأنهار ، كما يتدفق ويُفقد الماء من هذه الخزانات بطرق عديدة مثل التبخر. وحيث إن هناك حركة دائمة للمياه من وإلى الخزانات ، فإذا تساوت كمية الماء المتدفق إلى الخزانات مع كمية الماء الخارج منها فإن حجم الخزان يبقى ثابتا ، على الرغم من أن الماء يدخل ويخرج باستمرار .

وتبلغ كمية الماء الكلية التى يتم إمداد العالم بها حوالى 1.46 بليون كيلومتر مكعب ، وهى كمية ضخمة تتوزع بين الخزانات المختلفة . وهذه الكمية من الماء ثابتة على الرغم من أن معدل انسياب الماء من خزان لآخر قد يتغير من يوم لآخر ومن عام إلى عام ومن قرن إلى قرن . ولا يوجد على امتداد هذه الفترات الزمنية القصيرة أى إمداد أو فقد للماء الموجود فى باطن الأرض ، كما لا يوجد أى فقد ملحوظ للماء من الغلاف الجوى إلى الفضاء الخارجى للأرض .

ا. دورة الماء

يتحرك الماء فوق سطح الأرض أو تحتها ، أو يدور بين الخزانات الرئيسية على الأرض وهى المحيطات والغلاف الجوى واليابسة . ويسمى الدوران المستمر والدائم للماء من المحيط إلى الغلاف الجوى ، ومن الأمطار إلى سطح اليابسة ، ومن الصرف السطحى runoff للماء والمياه الجوفية إلى المجارى المائية (الأنهار أساسا) ، ثم مرة أخرى إلى المحيط بدورة الماء **hydrologic cycle** . ويوضح شكل (1.12) وصفا مبسطا لهذه الدورة الدائمة والمستمرة للماء بالإضافة إلى الماء المتحرك . ويتميز الماء بقدرته على التحول بين الحالات الثلاثة للمادة وهى السائل (الماء) والغاز (بخار الماء) والصلب (الجليد) ، وذلك تحت تأثير درجات الحرارة الموجودة فوق سطح الأرض .

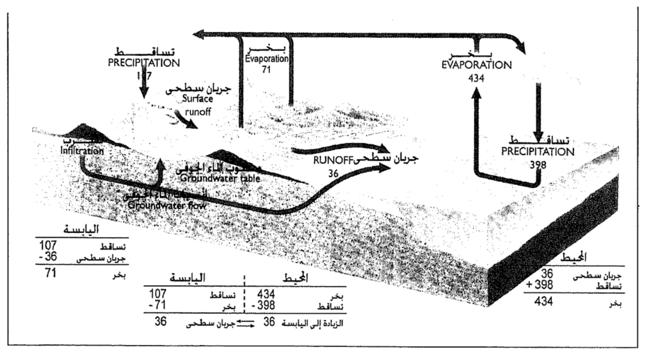
وتؤدى هذه التحولات إلى بعض الانسيابات الرئيسية من خزان إلى آخر فى دورة الماء. وتقوم حرارة الشمس بدور القوة المحركة فى دورة الماء ، حيث تعمل على تبخير الماء من المحيطات ، ثم تساعد فى نقله كبخار ماء إلى الغلاف الجوى . ويتكثف بخار الماء تحت ظروف مناسبة من الحرارة والرطوبة إلى قطرات من الماء بالغة الصغر تكوّن السحب ، ثم تسقط فى النهاية كأمطار أو جليد فوق المحيطات والقارات . ويتخلل بعض الماء الذى يسقط على اليابسة إلى الأرض **بالتسرب infiltration** ، وهى العملية التى يدخل فيها الماء إلى الصخر أو التربة عبر الشقوق أو بعض المسام الصغيرة الموجودة بين الحبيبات. ويتبخر بعض الماء الجوفى من سطح التربة ، بينما تمتص جذور النباتات جزءا آخر وتحمله إلى الأوراق لتعود إلى الغلاف الجوى أثناء عملية النتح (عرق النبات) **transpiration** وهو خروج بخار الماء من النبات . وقد يعود بعض الماء الجوفى إلى السطح من خلال الينابيع .

ويجرى ماء المطر الذى لا يتسرب فى الأرض فوق سطح الأرض ليتجمع تدريجيا فى المجارى المائية والأنهار. وتسمى كمية ماء المطر التى تجرى وتنساب فوق سطح الأرض **بالجريان السطحى runoff**. وقد يتسرب بعض ماء الصرف السطحى فى الأرض أو يتبخر من الأنهار والبحيرات ، ولكن ينساب معظم ماء الصرف السطحى إلى البحار والمحيطات .

وقد يتحول الثلج المتساقط إلى جليد فى المثالج ، والتى تعيد بدورها الماء إلى المحيطات بالانصهار والجريان السطحى ، أو إلى الغلاف الجوى بالتسامى sublimation وهو التحول من الحالة الصلبة (جليد)

مباشرة إلى الحالة الغازية (بخار الماء). ويعود جزء كبير من الماء الذى يتبخر من المحيطات إليها كماء مطر أو ثلج أو جليد . وتتساقط بقية الماء فوق اليابسة حيث يتبخر أو يعود إلى المحيطات كجريان سطحى. وتعرف عملية سقوط الماء على الأرض (محيطات ويابسة) من الغلاف الجوى فى صورة أمطار أو ثلج بالتساقط precipitation ، وتقاس بما يقابلها من ماء سائل دون اعتبار لصورة سقوطه .

والتساقط ، وبينما يفقد الكمية نفسها بالبخر. وبالتالى تبقى كمية الماء فى كل خزان ثابتة تقريبا . كما يوضح شكل (1.12) ، أن الماء المتبخر من المحيطات أكبر من الماء المتساقط عليها كأمطار . ويتم موازنة هذا الفقد من الماء الذى يعود إلى المحيطات نتيجة الصرف السطحى من القارات . ويأتى حوالى ثلث الماء الكلى المتساقط على اليابسة (107.000 كم^3) نتيجة البخر الزائد عن كمية الماء المتساقط على المحيطات (434.000 –



شكل (**1.12**): دورة الماء The hydrologic cycle

توازن حركة الماء فى الغلاف الجوى نتيجة البخر من المحيطات والقارات بالتساقط فى صورة أمطار وثلج . ويتوازن بخار الماء من المحيطات مع الصرف السطحى **surface runoff** من القارات وتساقط الأمطار فوق المحيطات . وتوضح الأرقام أسفل الرسم كيف يتوازن انسياب الماء من المحيطات واليابسة والغلاف الجوى مع بعضها البعض . الأرقام الموضحة بآلاف الكيلومترات المكعبة كل سنة .

ويوضح شكل (1.12) كيف تتوازن الخزانات مع بعضها البعض نتيجة الانسيابات الكلية فى النظام الأرضى الحالى والذى يتأثر بالنشاط الإنسانى . فمثلاً ، يحصل سطح اليابسة على الماء نتيجة التساقط ، وتفقد كمية الماء نفسها نتيجة التبخر والصرف السطحى . ويحصل المحيط على الماء من الصرف السطحى

398.000 = 36.000 كم^3) ، ويعود هذا الثلث بدوره إلى المحيطات كصرف سطحى.

II. كمية الماء المستخدم

تتحكم دورة الماء بشكل أساسى فى إمدادات الماء فى العالم . ومعظم الماء الذى نستخدمه هو ماء عذب تقريبا . وتأتى إمدادات الماء العذب الطبيعى فقط عن طريق الأمطار والأنهار والبحيرات وبعض المياه

الجوفية والماء المنصهر عن الثلج أو الجليد على اليابسة . وتأتى كل هذه المياه أساسا نتيجة تساقطها . كما تنتج كميات صغيرة من الماء العذب فى بعض المناطق القاحلة فى الشرق الأوسط وخاصة فى الخليج العربى ، من تحلية الماء المالح desalination (أى إزالة الملوحة منه). لذلك فإن الحد العملى لكمية الماء العذب الذى يمكن أن نستخدمه هو الكمية التى تسقط على القارات. ويعنى ذلك أيضا ، أن الماء العذب هو مصدر متجدد. وعلى الرغم من أننا قد نستنزف هذه المصادر من الماء مؤقتا ، إلا أن التساقط سوف يعوض هذا الاستنزاف خلال عدة آلاف أو مئات من السنين .

وينقسم الماء المتساقط على الأرض إلى ثلاثة أجزاء ، جزء منها يشمله الجريان السطحى، بينما يتبخر جزء آخر ويتسرب الجزء الثالث. ويستطيع الإنسان أن يستخدم الجزء من الماء الذى يتسرب فى الأرض ليكوّن المياه الجوفية ، بحفر الآبار. أما الجريان السطحى فيشمل الجزء من الماء الذى يمكن للإنسان أن يستخدمه بسهولة ويسر من الأنهار والمجارى المائية. وتؤثر أنشطة الإنسان وتتداخل فى عمليات دورة الماء الطبيعية. وسنذكر فيما يلى بعض تدخلات الإنسان فى هذه الدورة:

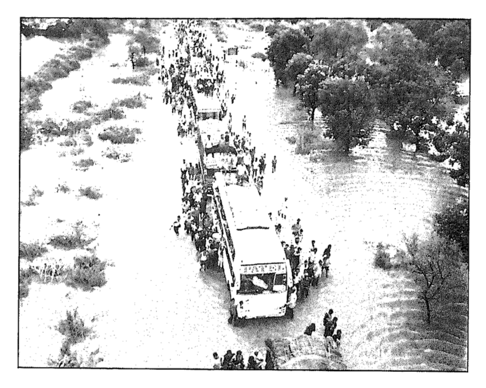
- يزيد التبخر نتيجة استخدام مياه الرى فى الأراضى الجافة .
- يؤثر تمهيد الطرق وتعبيدها على سطح الأرض وخاصة فى الطرق الطويلة السريعة ، والمبانى فى تقليل الماء المتسرب.
- يمكن أن تؤدى أنشطة الإنسان فى التدفئة عالميا وكذلك محليا إلى انصهار جليد المثالج ؛ مما يؤثر فى اتزان الماء فى الخزانات الأخرى.

ثانيا: الأنهار والنقل إلى المحيطات

تعتبر الأنهار من العوامل الجيولوجية الرئيسية التى تعمل على سطح الأرض ، حيث تقوم المجارى المائية من مختلف الأحجام مثل الجداول الصغيرة والأنهار الرئيسية بتعرية صخور الأساس ونقل وترسيب الرمل والحصى والطين. وسنتناول هنا العمل الجيولوجى للأنهار ، أى كيف تنساب المياه فى تيارات وكيف تحمل هذه التيارات الراسب ، وكيف تقوم المجارى المائية بتكسير وتعرية الصخور الصلبة ، وكيف تحفر المجارى المائية الوديان وتكون عدة أشكال أثناء حركة المياه .

ونحن نستخدم فى حياتنا اليومية بعض المصطلحات لوصف المجارى المائية المختلفة ، إلا أن الجيولوجيين يضعون مفاهيم أكثر دقة لبعض هذه المصطلحات . ولذلك يستخدم الجيولوجيون كلمة مجرى مائى **stream** لأى فرع يحتوى على ماء منساب، سواء كان كبيراً أم صغيراً، بينما يستخدمون كلمة نهر **river** للأنهار الرئيسية المتفرعة من مجرى مائى كبير.

وتلعب المجارى المائية دوراً مهمًّا فى حياتنا ، فهى تخترق معظم مدن العالم ، وتستخدم للملاحة ونقل البضائع والأفراد ، كما تستخدم كمصدر للماء للتجمعات السكنية والصناعية . فأنهار الأمازون والراين والمسيسيبى والنيل تستخدم كشريان حيوى للنقل . وقد بنيت معظم المدن الكبرى فى العالم مثل القاهرة والخرطوم ولندن وباريس وروما وموسكو فى وديان مجارى مائية . ويختار الناس أن يعيشوا بالقرب من مجارى الأنهار ، حيث يسهل البناء على قيعان الأودية المستوية ، كما تكون التربة خصبة والماء متوافرًا . فقد قامت الزراعة حول نهر النيل منذ الفراعنة حتى اليوم . كما تكون الحياة بالقرب من الأنهار محاطة بالمخاطر ، حينما تفيض الأنهار وتدمر الحياة والممتلكات القائمة حولها (شكل 2.12) .



شكل (2.12):صورة من أحد مواقع شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت) توضح فيضان أحد الأنهار بالهند .

وبالإضافة إلى أهمية المجارى المائية العملية والجمالية، فان للمجارى المائية أهمية حيوية كعوامل جيولوجية فى النواحى التالية:

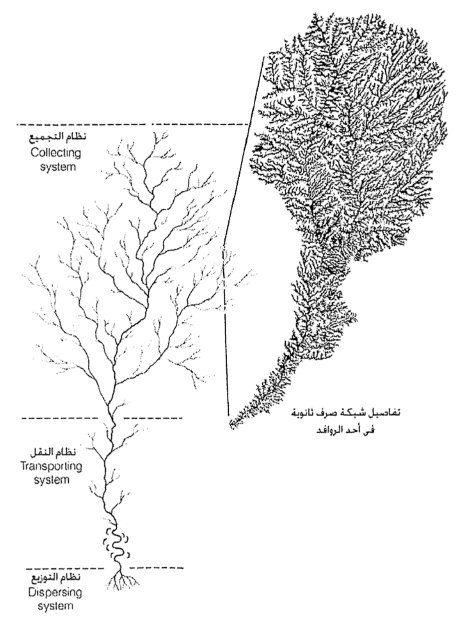
1. تحمل المجارى المائية معظم الماء الذى يتدفق من اليابسة إلى البحر ، وبذلك فإنه يعتبر جزءًا مهمًّا من دورة الماء .
2. تقوم المجارى المائية بنقل بلايين الأطنان من الرواسب إلى المحيطات كل عام ، حيث يتم الترسيب وتصبح الرواسب فى النهاية جزءا من التتابع الطبقى للأرض .
3. تقوم المجارى المائية بنقل كميات صغيرة من الأملاح الذائبة التى تكونت أثناء عملية التجوية إلى البحر . ويلعب هذا النقل دورا مهمًّا فى الحفاظ على ملوحة ماء البحر .
4. تقوم المجارى المائية بدور رئيسى فى تشكيل سطح الأرض . وتتكون التضاريس الأرضية أساسا من أودية للمجارى المائية تفصلها عن بعضها مرتفعات، نتيجة عملية التجوية والتعرية .

أ. المعالم الرئيسية للنظام النهرى

يتكون النظام النهرى river system من قناة رئيسية ، وهى الجزء المنخفض الذى يجرى فيه الماء ، كما يشمل أيضا كل المجارى المائية الأصغر التى تصب فى القناة الرئيسية وتعرف بالروافد tributaries . ويحيط بكل مجرى مائى حوض صرف **drainage basin** ، وهو المساحة الكلية التى تتجمع مياهها وأمطارها لتغذية هذا المجرى المائى . ويلاحظ أن لكل مجرى مائى حدودًا عند أطرافه ، قد تكون بعيدة أو قريبة عن مجراه، تعرف بمقسم المياه**divide water** وهو عبارة عن حيد أو تل مرتفع من الأرض يفصل بين حوضى صرف لنهرين متجاورين . وفى النظام النهرى ، ينحدر سطح الأرض ناحية شبكة من الروافد بحيث يعمل

نظام الصرف drainage system على تجميع وإزالة الرواسب والحطام الصخرى الناتج من التجوية كما لو كان قمع تجميع.

ويقسم النظام النهرى النموذجى إلى ثلاثة أقسام : 1- نظام تجميع ، 2- نظام نقل ، 3- نظام توزيع (انتشار) (شكل 3.12). ويعتبر التفرع صفة أساسية فى عديد من الشبكات التى تقوم بتجميع المواد المختلفة وتوزيعها . فمثلا ، تقوم شبكة الدورة الدموية فى الإنسان بتوزيع الدم على أجزاء الجسم المختلفة بنظام متفرع من الشرايين ، ثم تقوم بتجميعه بنظام آخر من



شكل (3.12): الأقسام الرئيسية للنظام النهرى

يتميز كل قسم من أقسام النظام النهرى بعمليات جيولوجية مختلفة . تتكون الروافد tributaries عند المنابع وتقوم بتجميع الماء والرواسب وتصب فى مجرى مائى رئيسى . يعمل المجرى الرئيسى كنظام نقل ، كما يقوم بالنحت والترسيب أيضا ويمثل الجزء السفلى من النهر نظام توزيع ، حيث تترسب معظم الرواسب فى دلتا أو فى مروحة طمية ، بينما يتشتت الماء فى المحيط .

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

الأوردة . وعلى الرغم من أن الحدود بين الأقسام الثلاثة للدورة تكون عموما تدريجية ، إلا أن الخصائص المميزة لكل قسم تكون ظاهرة . وفيما يلى عرض مختصر لكل قسم من أقسام النظام النهرى .

أ. نظام التجميع

يتكون نظام التجميع collecting system أو نظام الصرف drainage system للنهر من شبكة من الروافد فى منطقة أعالى النهر ومنبعه . والروافد **tributaries** هى مجارى مائية تقوم بتجميع المياه والرواسب لتصب فى المجرى المائى الرئيسى . وتأخذ الروافد عادة النمط الشجيرى dendritic (مثل الشجرة) ، مع العديد من التفرعات branches التى تمتد لأعلى المنحدر ناحية مقسم المياه . و تعتبر شبكة الروافد المعقدة واحدة من المعالم المميزة لنظام التجميع.

ب. نظام النقل

يتكون نظام النقل transporting system من المجرى الرئيسى الذى يعمل كقناة يتحرك فيها الماء والرواسب من منطقة التجميع إلى المصب . وبالرغم من أن نقل الماء هو العملية الأساسية فى هذا النظام ، إلا أنه يتم فى هذا الجزء أيضا تجميع ماء ورواسب إضافية، كما تحدث عملية ترسيب عندما ينثنى المجرى ، أو عندما يفيض النهر على ضفتيه أثناء فترة الفيضان . وهكذا فإنه تحدث عمليات تعرية وترسيب ونقل فى نظام النقل النهرى .

جـ. نظام التوزيع (الانتشار)

يتكون نظام التوزيع (الانتشار) dispersing system من شبكة من أفرع التوزيع **distributaries** عند مصب النهر ، حيث تتشتت الرواسب والمياه فى محيط أو بحيرة أو حوض جاف . وتتضمن العمليات الرئيسية فى هذا النظام ترسيب حمولة النهر من الرواسب الخشنة وتتشتت الحبيبات الناعمة ومياه النهر فى الحوض .

II. انسياب الماء فى مجارى المياه الطبيعية

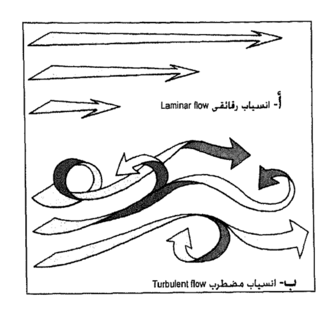
يمكن دراسة طبيعة الانسياب فى الأنهار عن طريق وضع صبغات فى المجرى المائى وملاحظة تحركه . وعندما يتحرك الماء فى أنبوبة زجاجية بسرعة بطيئة جدًا، فإنه ينساب فيما يعرف **بالانسياب الرقائقى (الصفائحى) laminar flow** ، وهو أبسط أنواع الحركة ، حيث يتحرك الماء فى طبقات متوازية دون أن تختلط أو تتقاطع . ونادرا ما يحدث الانسياب الرقائقى فى المجارى الطبيعية ، إلا أنه قد يحدث فى طبقات رقيقة جدا على امتداد قاع وجوانب المجرى المائى ، حيث يشيع هذا النوع من الانسياب فى المياه الجوفية تحت سطح الأرض .

أما **الانسياب المضطرب turbulent flow** فهو نوع آخر من التحرك غير المنتظم للماء ، حيث توجد دوامات تؤدى إلى اضطراب الماء أثناء الانسياب (شكل 4.12) . ويتحرك الماء المصبوغ أثناء الانسياب المضطرب إلى أعلى وأسفل المجرى المائى وعلى جانبيه ، مما يوضح أن الماء يمكن أن يرفع الراسب غير المتماسك من قاع النهر وينقله حتى مصب المجرى المائى.

وانسياب الماء فى المجرى المائى عملية معقدة تتأثر بعدة عوامل أهمها : أ. التصريف، ب. السرعة التى يتحرك بها الماء ، ج. شكل وحجم قناة المجرى المائى ، د. انحدار قناة المجرى المائى ، هـ. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) ، و. الحمولة (المواد التى يحملها أو يحركها الماء المنساب).

أ. التصريف : معدل تحرك الماء

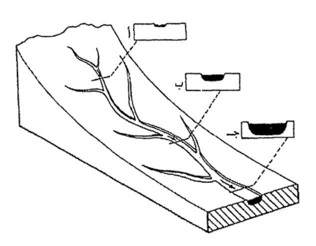
يبدو شكل المجرى المائى ثابتا ومستقرا عندما ننظر إليه من فوق جسر لعدة دقائق ، أو من خلال قارب لعدة ساعات . ولكن قد يتغير حجم هذا المجرى المائى



شكل (4.12): أنواع الانسياب فى الأنهار
أ) انسياب رقائقى laminar flow ، حيث تتحرك جزيئات الماء فى طبقات وخطوط متوازية.
ب)انسياب مضطرب turbulent flow ، حيث تتحرك جزيئات الماء حركة غير منتظمة مع وجود دوامات أثناء الانسياب.
(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

وسرعته فى مكان معين من شهر لآخر أو من موسم لآخر . فالمجارى المائية هى أنظمة ديناميكية ترتفع فيها المياه ، وقد تفيض أيضاً فى بعض السنوات ، كما تغير من شكل أوديتها خلال فترات زمنية أكبر . كما تغير المجارى المائية من معدل تدفقها وأبعاد المجرى الرئيسى عندما تنتقل من الروافد الضيقة الموجودة عند منبع المجرى المائى إلى السهول الفيضية الأكثر اتساعا عند الأجزاء الوسطى والسفلى من المجرى .

وتقدر كمية الماء الذى ينساب فى المجرى المائى بقياس التصريف **discharge** ، وهو كمية الماء التى يمر بنقطة معينة فى وحدة زمنية معينة أثناء انسيابه خلال قناة لها عمق وعرض محددان. ويقاس التصريف عادة بالأمتار المكعبة لكل ثانية أو بالقدم المكعب لكل ثانية. ويُراقب تصريف معظم أنظمة الصرف الكبرى فى العالم بالقياس عند عدة محطات خلال عدة سنوات . وتستخدم هذه المعلومات كأساس لتخطيط استخدام مصادر المياه والتحكم فى الفيضان وحساب معدلات التعرية وهكذا. وجدير بالملاحظة أن التصريف يزداد فى اتجاه مصب النهر بإضافة الماء من الروافد (شكل 5.12) . ويتغير تصريف المجرى الصغير من حوالى 0.25 إلى 300 م^3/ ثانية ، بينما يتراوح تصريف المجارى المائية الكبيرة (مثل المسيسيبى) بين 1400م^3/ ثانية إلى 57000 م^3/ ثانية وقت الفيضان . ويوضح شكل (6.12) متوسط تصريف نهر النيل عند أسوان عام 1944م دون تأثير لخزان أسوان . ويبلغ أقصى تصريف للنهر فى شهر سبتمبر حوالى 712 مليون م^3/ اليوم ، بينما يكون أقل تصريف للنهر فى شهر مايو ويبلغ 35 مليون م^3/ اليوم . كما يوضح الشكل أن الاختلاف فى التصريف يرجع إلى كمية الماء أثناء الفيضان . وبعد إقامة السد العالى بأسوان والتحكم فى كمية الماء ، انخفض التغير الموسمى فى التصريف بدرجة كبيرة .



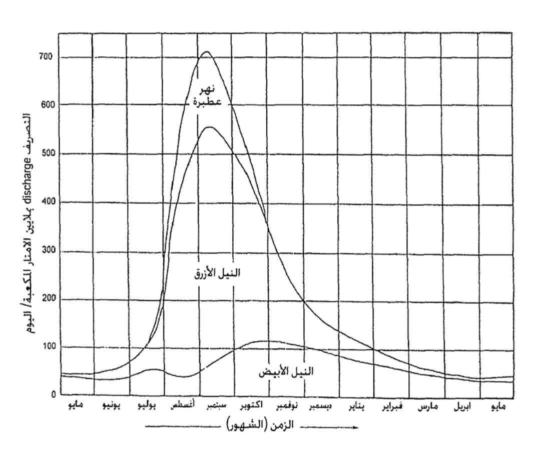
شكل (5.12): التغيرات فى نظام مجرى مائى نموذجى فى اتجاه المصب، حيث يقل انحدار gradient المجرى المائى ويزيد التصريف discharge (كما هو موضح بزيادة الروافد المتتابعة) ، كما يزيد عرض وعمق المجرى المائى الرئيسى (كما هو موضح فى القطاعات العرضية أ و ب و ج) وسرعته (كما تدل عليها أطوال الأسهم الثلاثة).
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ويمكـن حساب التصريف عن طريق حساب مساحة القطاع العرضى (العرض×متوسط عمق الجزء من المجرى المتلىء بالماء) وكذلك حساب سرعة الانسياب (المسافة التى يقطعها الماء فى الثانية):

التصريف discharge = مساحة القطاع العرضى للمجرى (متر مربع) × سرعة الانسياب (متر مكعب/ ثانية)

وتؤدى هذه المعادلة إلى توقع زيادة التصريف بزيادة مساحة القطاع العرضى أو سرعة الانسياب أو كليهما . فعندما يزيد ضغط الماء عند الصنبور فإن التصريف فى خرطوم مياه الحديقة يزداد ، وحيث إن القطاع العرضى للخرطوم المتمثل بقطر الخرطوم لايتغير ، فإن سرعة خروج الماء من الخرطوم سوف تزداد . فإذا زاد تصريف مجرى مائى عند نقطة معينة، فإن كلا من سرعة خروج الماء ومساحة المقطع العرضى للمجرى تزداد (تتأثر السرعة أيضا بانحدار المجرى ودرجة خشونة قاع المجرى وجوانبه) . وتزداد مساحة القطاع العرضى عندما يشغل الانسياب نسبة أكبر من عرض وعمق قناة المجرى المائى .

ويزداد التصريف الطبيعى فى معظم الأنهار فى اتجاه مصب النهر نتيجة زيادة انسياب الماء فى الروافد . والروافد كما ذكرنا سابقا هى مجارى مائية تتصل بمجرى مائى أكبر وتصرف فيه مياهها . وكما لاحظنا فإن زيادة التصريف تعنى أن العرض أو العمق أو السرعة يجب أن تزيد أيضا . ولكن عموما لا تزيد



شكل (6.12): متوسط تصريف discharge نهر النيل عند أسوان عام 1944م دون تأثير لخزان أسوان . يبلغ أقصى تصريف للنهر فى سبتمبر ، وأقل تصريف فى مايو .

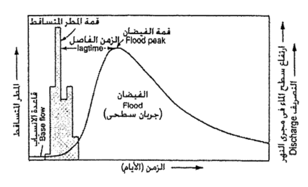
(After Hurst, 1944, in R. Said, 1981. The geological evolution of the River Nile. Springer Verlag).

السرعة فى اتجاه مصب النهر بالدرجة التى نتوقعها من زيادة التصريف ، بسبب نقص انحدار القنوات السفلى من المجرى المائى (قلة الانحدار تؤدى إلى انخفاض السرعة) (شكل 5.12) .

الفيضانات

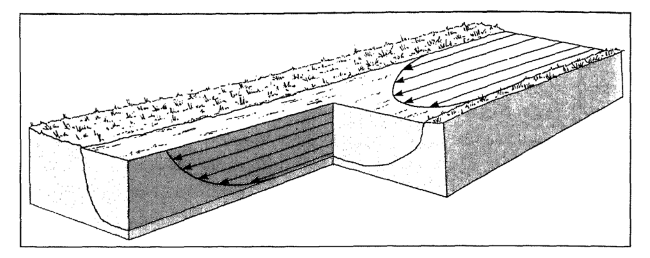
يعمل السقوط غير المنتظم للأمطار على مدار السنة، وكذلك انصهار الجليد والثلج غير المنتظم أيضا على أن يزيد الماء موسمياً فى المجارى المائية ليكوّن ما يعرف بالفيضان . ويحدث الفيضان **flood** عندما يصبح تصريف المجرى المائى كبيراً لدرجة أنه يزيد عن قدرة قناة المجرى المائى ، مما يؤدى إلى ارتفاع منسوب الماء الذى يملأ القناة ، إلى الدرجة التى يتخطى فيها ضفتى المجرى المائى ويغمر أرضاً ليست جزءا من مجراه . والفيضانات ظاهرة طبيعية متوقعة على الرغم من غضب بعض الناس عند حدوثها . وتفيض بعض الأنهار بانتظام ، كما يفيض البعض الآخر على فترات غير منتظمة ، بينما يفيض نهر النيل كل عام . كما تختلف الفيضانات فى الحجم أيضا ، فبعضها يكون كبيراً وله مستوى ماء مرتفع جداً يستمر لعدة أيام ، بينما تكون بعض الفيضانات الأخرى صغيرة . والفيضانات الصغيرة هى الأكثر شيوعاً ، وتحدث فى المتوسط كل عامين أو ثلاثة أعوام بينما تحدث الفيضانات الكبيرة عادة كل عشرة أو عشرين أو ثلاثين عاماً .

وتظهر التصريفات الكبيرة غير العادية والمصاحبة للفيضانات على هيئة قمة بارزة على الرسم المائى (هيدروجراف)hydrograph ، وهو رسم يوضح العلاقة بين تصريف المجرى المائى والزمن . وجدير بالملاحظة أن مستوى الماء فى المجرى المائى لا يرتفع بمجرد سقوط الأمطار ولكن يحتاج الماء إلى بعض الوقت ليتحرك من مكان انسيابه على سطح الأرض حتى يصل إلى قناة المجرى المائى ، ليزداد التصريف بسرعة ويصل إلى قمة الفيضان . وتسمى هذه الفترة الزمنية الفاصلة بين قمة الماء المطر المتساقط وقمة الفيضان بالزمن الفاصل lagtime (شكل 7.12) . وعند زيادة التصريف فى فترة الفيضان تزيد سرعة انسياب الماء أيضاً . وتؤدى زيادة السرعة إلى زيادة الحمولة النهرية ، وكذلك زيادة حجم الحبيبات المنقولة.



شكل (**7.12**): شكل يوضح الزمن الفاصل **lagtime** وهو الفترة الزمنية الفاصلة بين قمتى المطر المتساقط والفيضان .

ويمكن أن تكون الفيضانات الكبيرة مدمرة وتسبب خسائر كبيرة فى الأرواح والممتلكات . لذلك فإنه من الأفضل دراسة توقع حدوثها . وحيث أنه لا يمكن توقع مستوى الفيضان (سواء كان الارتفاع فى الماء أو التصريف) فى سنة معينة ، فإن أقصى ما يمكن عمله هو توقع ما يمكن حدوثه . فعلى سبيل المثال ، يمكن أن نتوقع احتمال حدوث فيضان بارتفاع ثلاثة أمتار فوق مستوى ضفة المجرى المائى بنسبة عشرين بالمائة . وتعنى هذه النسبة أن متوسط الفترة الزمنية بين فيضانين يبلغ ارتفاعهما ثلاثة أمتار هو خمس سنوات، (20٪ = 1 فى 5 سنوات) . ويسمى الفيضان بهذا الارتفاع فيضان 5- سنوات. ويسمى متوسط الفترة الزمنية بين ظاهرتين لهما شدة معينة (فى هذه الحالة فيضان ارتفاعه ثلاثة أمتار) فترة تكرار **recurrence interval** . و بمعنى آخر ، فإن إمكانية أن يتكرر فيضان بحجم معين يطلق عليها فترة التكرار. ويسمى



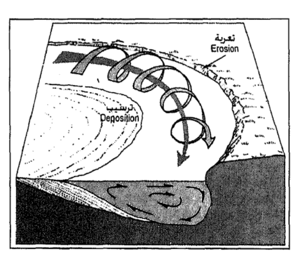
شكل (8.12): التغير فى سرعة انسياب الماء فى القنوات المستقيمة ، حيث تحدث تلك التغيرات أفقيا ورأسيا عندما يقلل الاحتكاك من سرعة الماء على امتداد قاع وجوانب المجارى المائية . وتزيد سرعة الانسياب كلما اقتربنا من سطح ومركز قناة المجرى المائى المستقيمة .
(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

الفيضان الأكبر حجماً (ستة أمتار مثلا) للمجرى المائى نفسه والمحتمل حدوثه كل 50 سنة فقط بفيضان - 50 سنة .

ب. السرعة التى يتحرك بها الماء

لا تكون سرعة انسياب الماء منتظمة فى كل مكان على طول قناة المجرى المائى . وتعتمد هذه السرعة كما ذكرنا على شكل وخشونة قناة المجرى المائى ، وكذلك على نمط المجرى المائى . وتزيد سرعة الانسياب كلما اقتربنا من سطح ومركز قناة المجرى المائى، حيث يكون العمق أكبر ما يكون ويقل احتكاك الماء بجدران المجرى المائى والقاع (شكل 8.12) . وعندما تنحنى قناة المجرى فى منعطف meander فإن نطاق السرعة الأعلى ينتقل إلى الجزء الخارجى من الانحناء بينما ينتقل نطاق السرعة الأقل إلى الجزء الداخلى للمنحنى (شكل 9.12) . وهذا النمط من الانسياب مهم فى التعرية الجانبية لقنوات المجرى المائى، وتغير شكل أنماط المجارى المائية .

وتتناسب سرعة انسياب الماء مع انحدار قناة المجرى المائى . ويؤدى الانحدار الشديد لقاع المجرى



شكل (9.12): انسياب الماء فى قناة منحنية ، حيث يتبع الانسياب نمطًا حلزونيًا ويجبر الماء على الانسياب فى الجزء الخارجى من المنحنى بسرعة أكبر من الجزء الداخلى . ويؤدى هذا الاختلاف فى سرعة الانسياب ، بالإضافة إلى الاحتكاك الطبيعى بجدار قناة المجرى المائى ، إلى تكون نمط حلزونى للانسياب . ونتيجة لذلك ، فإن التعرية تحدث على الضفة الخارجية ، بينما يحدث الترسيب على الجزء الداخلى من المنحنى . وتؤدى تلك العمليات إلى تكون مجرى مائى غير متماثل يهاجر جانبيا ببطء .
(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

المائى إلى الانسياب السريع ، وهو يحدث عادة فى المجارى المائية المتواجدة فى المناطق المرتفعة . وتتكون الجنادل **rapids** عندما تكون الانحدارات قليلة ، بينما تتكون مساقط المياه **waterfalls** عندما تكون الانحدارات شديدة جدا حيث تكون سرعة الحركة حينئذ مساوية لسرعة السقوط الحر . وعندما يدخل المجرى المائى فى بحيرة أو محيط فإن معدل السرعة يتناقص فورا إلى الصفر . وتعتمد أيضا سرعة الماء المنساب فى قناة المجرى المائى على الحجم ، فكلما زاد الحجم ، كان الانسياب أسرع .

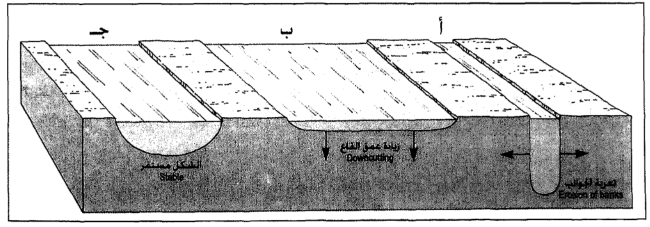
جـ. شكل وحجم قناة المجرى المائى

يؤثر شكل القطاع العرضى لقناة المجرى المائى على طبيعة الانسياب ، وكذلك على السرعة التى يتحرك بها حجم معين من الماء فى المجرى حتى المصب . ففى القنوات العميقة الضيقة (شكل 10.12 أ) ، تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء كبيرة جدا ، مما يؤدى إلى نقص سرعة الماء نتيجة زيادة الاحتكاك . وبالمثل تكون مساحة السطح كبيرة فى القناة العريضة الضحلة (شكل 10.12 ب) ، والتى يكون قاعها مسطحا تقريبا . ويؤدى نقص سرعة الانسياب فى كلتا الحالتين إلى تأخر الانسياب . وتكون سرعة الانسياب أكبر ما يكون فى القنوات التى تكون بها أقل مقاومة للانسياب . ففى القنوات شبه الدائرية (شكل 10.12 ج) تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء أقل ما يمكن ، وبالتالى يكون بها أقل مقاومة للانسياب .

وبالإضافة إلى ما سبق ، فإن الانسياب يقل فى القنوات خشنة الجوانب والقاع ، وكذلك تلك التى ينتشر بها الجلاميد والعوائق الأخرى ، بينما يتحرك الماء بسرعة أكبر فى القنوات الملساء المغطاة بالصلصال ، حيث تكون المقاومة أقل .

د - انحدار قناة المجرى المائى

يكون **انحدار gradient** قاع المجرى المائى أشد فى مناطق أعالى النهر جهة المنبع ، ويقل الانحدار لأسفل فى اتجاه المصب . ويوضح شكل (11.12) حوض النيل وارتفاع النهر فوق سطح البحر فى عدة



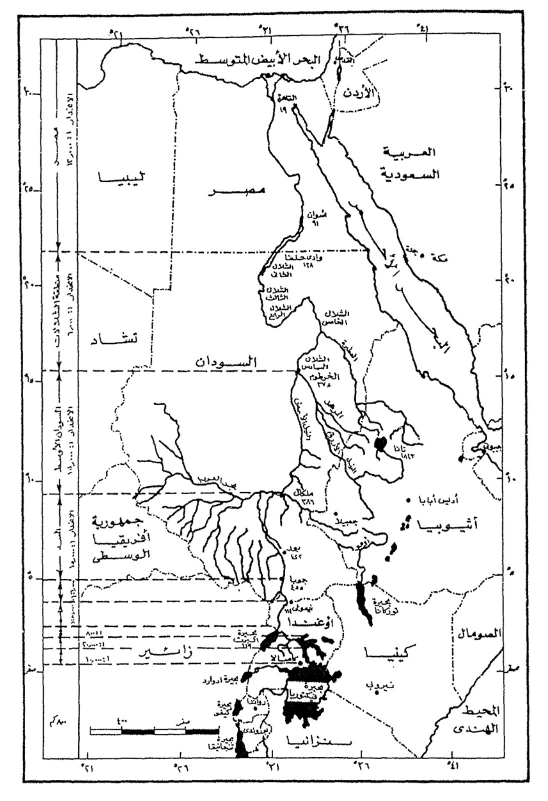
شكل (10.12): تغير قنوات المجرى المائى شكلها لتقلل الاحتكاك أثناء الانسياب

أ. قناة عميقة ضيقة ، حيث تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء كبيرة . وتؤدى التعرية نتيجة زيادة الاحتكاك لزيادة عرض القناة .

ب. قناة عريضة ضحلة ، حيث تكون مساحة السطح كبيرة ، مما يؤدى إلى انخفاض سرعة الماء وترسيب بعض حمولة النهر . وتميل القناة لأن تصبح أعمق وأضيق .

جـ. قناة شبه دائرية ، حيث تكون مساحة السطح لكل وحدة حجم من الماء أقل ما يمكن ، وتكون بها أقل مقاومة للانسياب .

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

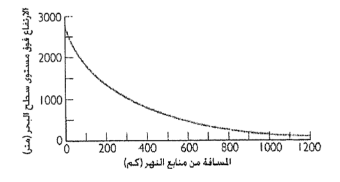


شكل (11.12): حوض نهر النيل ، موضحا ارتفاع النهر فوق سطح البحر في مواقع مختارة بغرض توضيح اختلاف درجة انحدار gradient النهر في أجزائه المختلفة .

(المصدر: سعيد، رشدى ، 1993م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه في الماضي والمستقبل، دار الهلال) .

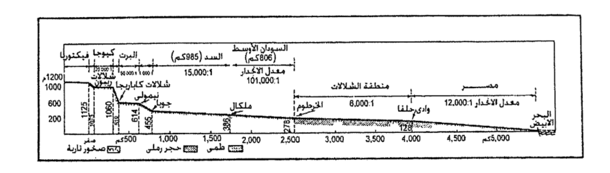
مواقع لتوضيح اختلاف درجة انحدار النهر . فكلما تحركنا نحو المصب قل الانحدار. ويمكن وصف انحدار نهر ما من المنبع حتى المصب من ملاحظة القطاع الطولى للنهر . ويقاس انحدار المجرى المائى بالأمتار لكل كيلو متر أو بالقدم لكل ميل. فإذا كان الانحدار 5 أمتار لكل كيلو متر ، فهذا يعنى أن قاع النهر يهبط خمسة أمتار رأسيا لكل كيلو متر على امتداد النهر أفقيا . ويوضح شكل (12.12) انحدار أنهار بلات Platte وسوث بلات South Platte من المنبع وسط كولورادو وحتى المصب فى نبراسكا. ويسمى هذا المنحنى الأملس المقعر نحو المنبع ، والذى يعطى صورة لقطاع فى النهر ، بالقطاع الطولى **longitudinal profile** . ويكون لكل المجارى المائية ، من الجداول الصغيرة حتى الأنهار الكبيرة الشكل العام المقعر نفسه نحو المنبع ، والذى يكون حادا بشكل ملحوظ بالقرب من منبع المجرى المائى ، بينما يقل الانحدار ويكون مستويا تقريبا بالقرب من المصب . ويوضح شكل (13.12) قطاعًا طوليًّا فى نهر النيل من بحيرة فيكتوريا وحتى البحر المتوسط ، وهو يوضح معدل انحداره ، والذى يتراوح بين 1:10000 و 1:12000 من أسوان حتى القاهرة .

ويرجع السبب فى أن كل المجارى المائية ، والتى قد تختلف عن بعضها فى بعض التفاصيل ، يكون لها القطاع الطولى نفسه إلى وجود عدد من العوامل التى تتحكم فى عمليات التعرية والترسيب ، حيث تكون التعرية أسرع عند منبع النهر عنها عند مصبه ، بينما يكون الترسيب هو العامل الأقوى عند مصب المجرى المائى .



شكل (**12.12**): قطاع طولى longitudinal profile فى نهرى بلات Platte وسوث بلات South Platte من المنبع وحتى المصب . ويرسم القطاع الطولى بإسقاط ارتفاع قاع المجرى المائى مقابل المسافة من المنبع . وتتميز كل المجارى المائية ، سواء كانت جداول أو أنهار كبيرة ، بهذا الشكل العام للقطاع الطولى المقعر نحو المنبع ، على الرغم من أن المنحنى قد يكون أكثر أو أقل حدة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition, W. H. Freeman and Company, New York).

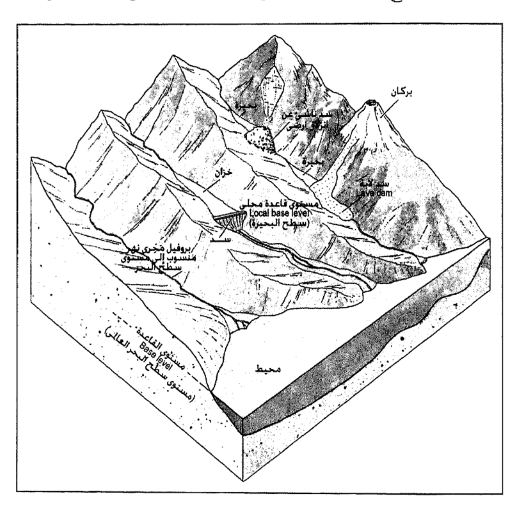


شكل (**13.12**): قطاع طولى لنهر النيل من بحيرة فيكتوريا إلى البحر المتوسط ، يبين معدل انحدار بسطات النهر والأنهار الموصلة لها . (المصدر: سعيد، رشدى ، 1993م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه فى الماضى والمستقبل، دار الهلال) .

هـ. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)

عندما ينساب مجرى مائى فى اتجاه مصبه، فإن طاقته الكامنة (طاقة الوضع) تقل حتى تصل إلى الصفر عندما يصل إلى البحر. وعند ذلك لا تكون للمجرى المائى القدرة على أن يُعمق قاعه. ويسمى المستوى النهائى الذى يصل إليه قاع المجرى المائى أو النهر بحيث لا يكون قادرا على مزيد من التعرية بمستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) base level للمجرى المائى. ويعتبر سطح البحر هو الحد الأدنى للتعرية لمعظم المجارى المائية (شكل 14.12)، ويستثنى من ذلك المجارى المائية التى تصب فى أحواض داخلية مغلقة غير متصلة بالبحر، مثل البحيرات. كما يعتبر النهر الرئيسى مستوى قاعدة لروافده.

وعند ربط مستوى القاعدة لمعظم المجارى المائية بسطح البحر فإنه يجب أن نعرف أن مستوى سطح البحر فى العالم قد تغير عبر الأزمنة الجيولوجية الطويلة نتيجة التغير فى شكل وسعة أحواض المحيطات، ونمو



شكل (14.12): علاقة المجارى المائية بمستوى القاعدة base level (مستوى سطح البحر على مستوى العالم) وبالمستويات الأدنى المحلية. ينساب المجرى المائى على اليسار مباشرة إلى المحيط، والذى يمثل المستوى القاعدى (المستوى الأدنى للتعرية) له، بينما ينساب المجرى المائى (فى الوسط) إلى خزان مائى خلف السد، حيث يمثل الخزان الحد الأدنى للتعرية المحلى؛ بينما يكون المحيط هو مستوى القاعدة لجزء المجرى المائى أسفل السد. وبالمثل يوجد مستويان أدنيان للتعرية للمجرى المائى على اليسار، بينما يكون المحيط هو مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) أسفل اللابة.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

أو انكماش المثالج على القارات ، ولذلك فإن مستوى القاعدة يتغير دائماً ببطء .

وتجدر الإشارة إلى أن كل المجارى المائية لا تنساب بانتظام من المنبع حتى المصب، فقد تعترض البحيرات بعض هذه المجارى ، حيث تتكون هذه البحيرات خلف سدود طبيعية نتجت عن انزلاقات أرضية أو رواسب جليدية أو انسياب للابة . وعندما ينساب مجرى مائى فى بحيرة ، فإن سطح البحيرة يعمل كمستوى قاعدى محلى للتعرية (شكل 14.12). وقد ينخفض ماء البحيرة ويُصرف خارجها لأى سبب من الأسباب . وعند تغير مستوى القاعدة المحلى، فإن المجرى المائى يغير من شكل مقطعه الطولى ليكون فى حالة اتزان مع الظروف المتغيرة.

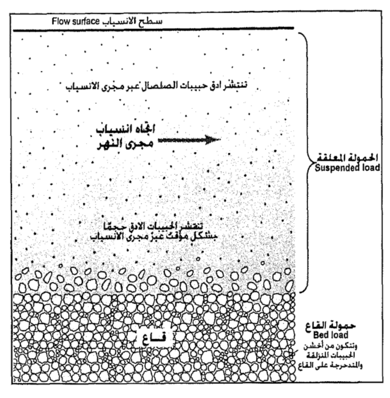
كما أن إقامة السدود الصناعية الكبرى على الأنهار يقطع الانسياب الطبيعى للمجرى المائى . وتُبنى هذه السدود بغرض تخزين الماء والتحكم فى الفيضان وتوليد الطاقة الكهربية (طاقة كهرومائية) . وتعمل هذه السدود والماء المتجمع أمامها على رفع مستوى القاعدة بالنهر، وكذلك تغيير شكل القطاع الطولى للنهر ليتوافق مع الظروف الجديدة . ويرجع السبب فى ذلك إلى أن بناء السد الصناعى على المجرى المائى يؤدى إلى تكوين خزان ، يقوم بحجز معظم الرواسب التى كان يحملها هذا المجرى إلى المحيط . ويؤدى ذلك إلى تراكم الرواسب التى تملأ الخزان فى النهاية . وهذه واحدة من المشكلات التى تواجه إنشاء السدود على المجارى المائية ، وتتنبأ بعض الدراسات أن بحيرة ناصر أمام السد العالى جنوب أسوان بمصر سيمتلئ نصفها تقريباً بالطمى خلال القرن الحادى والعشرين .

و. الحمولة

تختلف قدرة المجارى المائية على التعرية وحمل الفتات والرواسب . ويستطيع الماء المنساب انسيابا رقائقيا (صفائحيا) أن يحمل أصغر وأخف الحبيبات فقط ، وهى عادة فى حجم الصلصال . أما الماء المنساب انسيابا مضطربا ، فإنه يستطيع أن يحرك حبيبات تتراوح بين حجم الصلصال وحجم الحصى بل والحصى الكبير (جليمود) . وعندما يحمل الماء المنساب انسيابا مضطربا الحبيبات من قاع المجرى المائى ، فإنه يحملها فى اتجاه المصب . كما يقوم بدحرجة ودفع الحبيبات على القاع . وتشمل **الحمولة المعلقة suspended load** للمجرى المائى كل المادة المعلقة فى الماء المنساب سواء كانت بصورة مؤقتة أو دائمة . أما **حمولة القاع bed load** للمجرى المائى فهى تشمل المادة التى يحملها المجرى المائى على امتداد قاع المجرى بالانزلاق أو الدحرجة (شكل 15.12) .

وكلما كان التيار أسرع ، كلما كان حجم الحبيبات المنقولة كحمولة معلقة أو حمولة قاع أكبر . وتسمى قدرة المجرى المائى على حمل مادة أو فتات من حجم معين **بالكفاءة competence**. ويلاحظ أن القدرة على نقل هذا الفتات تقدر بحجم الحبيبات المنقولة وليس بكميتها. وعندما تزيد سرعة التيار ويحمل الحبيبات الخشنة تزداد الحمولة المعلقة ، وتتحرك فى نفس الوقت كميات أكبر من مادة القاع ، وتزداد أيضاً حمولة القاع . وكما هو متوقع ، فكلما زاد حجم الانسياب زادت الحمولة المعلقة أو حمولة القاع التى يستطيع هذا الانسياب حمله. وتسمى كمية الرواسب الكلية المحمولة بالانسياب بقدرة **capacity** المجرى المائى .

ويؤثر التداخل بين السرعة وحجم الانسياب فى كل من كفاءة وقدرة المجرى المائى ، فيحمل نهر الميسيسيبى على امتداد معظم مساره حبيبات يتراوح حجمها بين دقيقة إلى متوسطة الحجم فقط أى صلصال ورمل ، عند السرعات المتوسطة ولكن بكميات كبيرة . أما



شكل (**15.12**): عندما ينساب تيار مائى فى مجرى يتكون قاعه من الرمل والغرين والصلصال، فإنه ينقل الحبيبات بطريقتين هما النقل كحمولة قاع bed load حيث تنزلق الحبيبات الخشنة وتتدحرج على امتداد القاع ، أو كحمولة معلقة suspended load حيث تتعلق الحبيبات الناعمة بالماء المنساب لبعض الوقت أو طول الوقت .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

فى حالة مجرى مائى جبلى صغير حاد الانحدار وسريع الانسياب ، فإنه يستطع حمل الجلاميد ، ولكن بكميات قليلة فقط . وسنناقش نقل الرواسب وتعرية الأرض فى أجزاء أخرى تالية .

III. أشكال القنوات النهرية

تختلف القنوات النهرية فى حجمها وشكلها . ويرجع تعدد أشكال القنوات النهرية إلى اختلاف أنواع العلاقات التى تربط بين انحدار gradient القنوات وتصريفها discharge وحمولتها load من الرواسب . ونناقش هنا ثلاثة أشكال من القنوات النهرية وهى المستقيمة والمنعطفة أو المتثنية والمجدولة أو المضفرة .

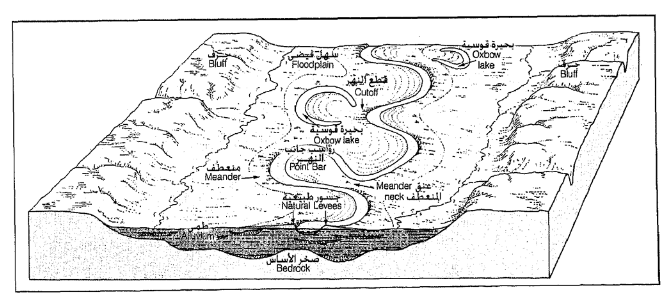
أ. القنوات المستقيمة

يعتبر وجود أجزاء مستقيمة فى القنوات النهرية الطبيعية أمرا غير شائع . وتنشأ الاستقامة فى القنوات النهرية عند مرور القناة فى منحدرات شديدة أو أن تتبع خطوط انكسارات أو صدوع أو فواصل فى القشرة الأرضية .بينما يسمى شكل القناة النهرية التى بها عدة انحناءات شكلا متعرجا . وإذا فحصنا جزءا مستقيما من قناة طبيعية عن قرب ، لوجدنا أن به بعض الانحناء أو التعرج ، حيث لايتبع الخط الذى يصل بين أعمق الأجزاء فى القناة مساراً مستقيماً متساوى البعد بين الضفتين ، ولكنه يتعرج جيئة وذهابا عبر القناة . وقد ينتج مثل هذا النمط فى البداية نتيجة تغيرات عشوائية فى عمق القناة . وفى المناطق التى يكون فيها عند أحد جانبى القناة مياها عميقة ، تتراكم الرواسب على

الجانب المقابل من القناة على هيئة حاجز bar، حيث تكون السرعة أقل . ويعمل الانسياب المتعرج عبر القناة على تكوين تعاقب من الحواجز على جانبى القناة بالتبادل. وتعتبر قناة مجرى النيل فى مصر قناة مستقيمة تقريبا أو حتى متعرجة ، ولكن لايعتبر نهر النيل نهرا منعطفا ، على الرغم من احتوائه على القليل من المنعطفات خاصة فى الدلتا.

ب. القنوات المنعطفة أو المتثنية

تتكون قناة المجرى المائى فى عديد من المجارى المائية من تتابع من الانحناءات والأقواس الملساء المتماثلة فى الحجم . وتشبه هذه الانحناءات والأقواس فى شكلها الطريق المتعرج فى منطقة جبلية (شكل 16.12) . ويسمى هذا الانحناء فى قناة المجرى المائى بالمنعطف **meander** ، وهو مشتق من الاسم اللاتينى لنهر مندريس Menderes River فى تركيا ، والذى يتميز بمجراه المتعرج . ويجب ملاحظة أن المنعطفات لا تتكون مصادفة ، بل تتكون عادة فى مجارى مائية تنساب على منحدرات لطيفة الانحدار فى سهول أو أراضٍ منخفضة ، حيث تقطع القنوات رواسب غير متماسكة (رمل ناعم وغرين أو طين) أو صخر أساس سهل التعرية . وتقل المنعطفات على المنحدرات المرتفعة وصخور الأساس الصلبة ، حيث تتبادل المنعطفات فى تلك المناطق مع امتدادات مستقيمة نسبياً وطويلة . وقد يرجع وجود المنعطفات أيضاً إلى أن انسياب الماء يكون مضطرباً ، ويعمل أى انحناء أو عدم انتظام فى القناة إلى انسياب الماء إلى الضفة المقابلة . وتتسبب قوة الماء التى تضرب ضفة (جانب) المجرى المائى فى حدوث نحت وتقويض ، مما يؤدى إلى بدء انحناء صغير فى مجرى النهر. ومع استمرار اصطدام التيار بالجانب الخارجى للقناة ، ينمو المنحنى ويتحول إلى منعطف كبير. وكما ذكرنا سابقاً ، فإن المياه تكون ضحلة وسرعتها منخفضة عند الناحية الداخلية من المنعطف ، حيث تتراكم بعض حمولة الرواسب خشنة الحبيبات ، لتكوّن ما يعرف برواسب جانب النهر أى**الحاجز الحرفى** (الجانبى) **point bar** عند الناحية الداخلية لحلقة المنعطف (شكل 16.12) . وتؤدى هاتان العمليتان



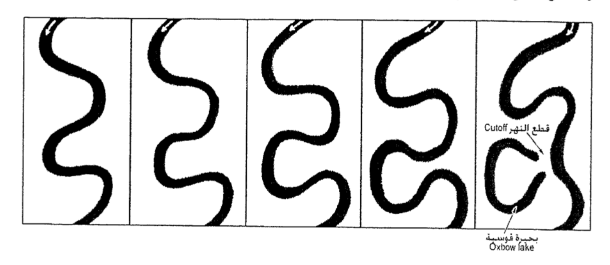
شكل (16.12): المعالم الرئيسية المميزة للسهل الفيضى flood plain . ويحتوى السهل الفيضى على منعطفات meanders ورواسب جانب النهر point bars وبحيرات قوسية oxbow lakes وجسور طبيعية natural levees ومجارى يازو yazoo streams (والذى يعتبر رافدا منسابا موازيا للنهر الرئيسى ويجد صعوبة فى الالتقاء به بسبب الجسور الطبيعية العالية).

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

الرئيسيتان من النحت فى الناحية الخارجية من المنعطف، والترسيب على الناحية الداخلية ، إلى تحرك حلقة المنعطف وهجرتها جانبيا حيث يزيد الراسب على إحدى ضفتى المجرى المائى بينما ينقص على الجانب الآخر .

وهكذا ، فإن المنعطفات تغير مكانها من جانب إلى آخر ، كما تغير مكانها أيضا فى المجرى المائى فى اتجاه المصب ، حيث تتحرك بطريقة ملتوية مثل الحية ، أو كما يتحرك حبل طويل على شكل ثعبان (شكل 17.12) .

النهاية ، تقطع قناة النهر حلقة المنعطف وتسير فى مجرى آخر أقصر . ويؤدى قطع النهر **cutoff** للمنعطف إلى زيادة حدة انحدار مجرى النهر ، مما يؤدى إلى أن يتخلى النهر تماماً عن حلقة المنعطف القديمة نتيجة الترسيب على امتداد حافة القناة الجديدة ، وتبقى حلقة المنعطف القديمة على شكل بحيرة هلالية الشكل ، تعرف ببحيرة قوسية (بحيرة قرن الثور) **oxbow lake** (شكل 12. 16 و 17) ، أو بحيرة مقتطعة أو متبقية.



شكل (**17.12**): المراحل المتعاقبة فى تكوين المنعطفات ، حيث يؤدى قطع النهر لمنعطف إلى تكوين بحيرة قوسية (بحيرة قرن الثور) .
(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

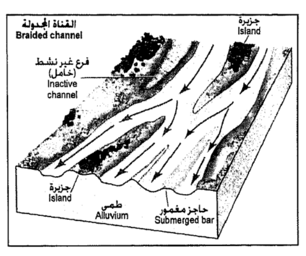
وقد تكون هجرة المنعطفات سريعة ، حيث قُدرت حركة بعض المنعطفات فى نهر الميسيسيبى بحوالى 20 متراً فى العام . وحينما تتحرك المنعطفات ، فإن الحواجز الحرفية تتحرك أيضاً ، ويتكون تراكم من الرمل والغرين على جزء من السهل الذى هاجرت خلاله القناة . ويؤدى نشأة المنعطف وتطوره إلى قلة انحدار النهر .

وتنمو الانحناءات مقتربة من بعضها أكثر فأكثر بطريقة غير منتظمة . وعندما يصبح منحنى المنعطف واضحاً وبارزاً ، فإنه يكوّن دائرة كاملة تقريباً . وفى

جـ. القنوات المجدولة أو المضفرة

يكون لبعض القنوات النهرية عدد من القنوات وليس قناة واحدة . وتتفرع القنوات ثم تتحد فى هذه المجارى المجدولة أو المضفرة **braided streams** فى نمط يشبه الشعر المجدول . وينساب الماء فى القنوات المجدولة فى قناتين متجاورتين أو أكثر ولكنها متصلة ببعضها ، حيث يفصل بينها حواجز أو جزر (شكل 18.12) . ويتكون هذا الشكل نتيجة وجود حمل رسوبى كبير وتغير كبير فى حجم الماء المنساب ، بالإضافة إلى وجود جوانب للنهر سهلة التعرية ، والتى

تستطيع أن تمد المجرى المائى بحمل وافر من الرواسب. فإذا كان النهر غير قادر على تحريك كل الحمولة الرسوبية الموجودة ، فإنه يكوّن راسبًا خشن الحبيبات على هيئة حاجز يقسم الانسياب محليا ويركزه فى الأجزاء الأعمق من القناة على أحد الجانبين. وقد يرتفع هذا الحاجز لأعلى فوق سطح الماء نتيجة الترسيب المستمر ليكوّن جزيرة قد تصبح مستقرة نتيجة نمو النباتات فوقها . ويبلغ عدد الجزر فى نهر النيل من أسوان إلى القاهرة 492 جزيرة ، هذا عدا الجزر الصخرية جنوب أسوان . وتكون معظم هذه الجزر مستطيلة الشكل ، وتتكون من الرمل والغرين ، ويقع معظمها فى الأجزاء المنعطفة من قناة مجرى النيل .



شكل (18.12): تتميز القناة الرئيسية فى القنوات المجدولة أو المضفرة braided channel بوجود جزر. وتوضح الأسهم اتجاه انسياب المجرى المائى ، كما توضح المسار الذى يصل بين أعمق الأجزاء فى المجرى المائى .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

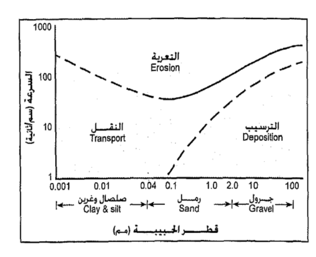
IV. التعرية بالمجارى المائية

يبدأ النحت بالمياه حتى قبل أن يتجمع الماء فى مجرى مائى محدد . وتحدث التعرية إما بالتصادم عندما تضرب قطرات الماء الأرض ، أو بانسياب مياه الأمطار الغزيرة فوق سطح الأرض . فعندما تضرب قطرات المطر الأرض العارية فإنها تزيح أجزاء صغيرة من التربة السائبة وتنتشر فى كل الاتجاهات ، حيث تتحرك مكونات التربة فوق المنحدرات . وجدير بالملاحظة أن تأثير قطرة واحدة يكون محدودا ، بينما يكون تأثير عدد ضخم من القطرات كبيرا جدًّا فى التعرية . كما يلاحظ أن تأثير قطرات الماء على الأرض المغطاة بالنبات يكون محدودا .

ونستطيع أن نلاحظ تيار الماء وهو يلتقط الرمال السائبة من قاع المجرى بسرعة ويحملها بعيداً ويتعرى القاع . وتستطيع المجارى المائية عند ارتفاع مستويات الماء بها أثناء الفيضان أن تقطع جوانب المجارى المائية غير المتماسكة ، حيث تتدهور وتسقط فى الماء المنساب وتُحمل بعيداً .

وتعتمد قدرة المجرى المائى على التقاط حبيبات الراسب السائبة وتحريكها على امتداد القناة على مدى اضطراب الماء وسرعته . ويوضح شكل (19.12) السرعات المطلوبة لتعرية حبيبات من أحجام مختلفة من قاع مجرى مائى ، ومدى السرعة التى يمكن خلالها نقل الحبيبات ، والسرعات التى لا تستطيع بعدها الحبيبات الحركة وتستقر على القاع . وتزيد قدرة الماء المضطرب على حمل حبيبات أكبر حجما كلما زادت سرعته ، ويستثنى من ذلك الغرين والصلصال ، حيث إنها تميل للتماسك وتكون كتلة متماسكة ملساء يصعب تعريتها إلا تحت ظروف سرعة عالية .

وجدير بالذكر ، أننا لا نستطيع ملاحظة التعرية البطيئة للصخر الصلب ، حيث يقوم الماء الجارى بتعرية الصخر الصلب بعمليات كالبرى والتجوية الكيميائية والطبيعية أو التقويض الذى ينشأ من تأثير التيارات.



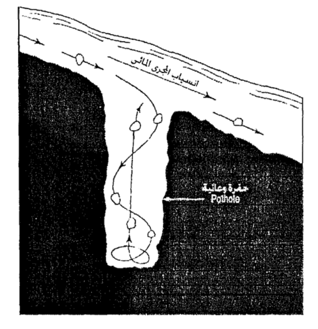
شكل (19.12): شكل يوضح كيفية تحكم سرعة المجرى المائى فى تعرية ونقل وترسيب حبيبات الرواسب من مختلف الأحجام.
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

أ. البرى

يعتبر البرى إحدى الطرق الرئيسية التى يستطيع بها النهر تكسير الصخر وتعريته. والبرى abrasion هو تآكل الصخر ميكانيكيا نتيجة احتكاكه بالحصى والرمال التى تحملها المياه. وقد يؤدى دوران بعض الحصى والحصى الكبير (الجلاميد) فى الدوامات المتحركة على قاع النهر إلى تكوين حفر ناعمة الجدران دائرية الشكل تشبه القِدر تعرف **بالحفر الوعائية potholes** (شكل 20.12)، حيث تستمر القطع الصخرية الخشنة فى الدوران والحركة داخل الحفر بفعل التيارات النهرية.

ب. التجوية الكيميائية والطبيعية

تعمل التجوية الكيميائية على تحلل الصخور فى قيعان القنوات النهرية، وذلك بتغيير التركيب المعدنى للصخر مما يؤدى إلى ضعفه على امتداد الكسور والفواصل، كما يحدث على سطح اليابسة. أما التجوية الفيزيائية فقد تكون عنيفة نتيجة ارتطام الجلاميد والتصادم المستمر للحصى والرمال مما يؤدى إلى شطر الصخر وتجزئته على امتداد الكسور. ويتكسر الصخر فى الأنهار نتيجة التعرض لهذه التصادمات بمعدل أكبر بكثير مقارنة بالتجوية البطيئة على جوانب التلال اللطيفة الانحدار فوق اليابسة. وقد تستطيع بعض الدوامات القوية اقتلاع وسحب بعض الكتل الكبيرة من صخر الأساس بقاع النهر نتيجة التجوية والتصادم.



شكل (20.12): تعرية قاع المجرى المائى الصخرى. تتكون الحفر الوعائية potholes، عندما تتحرك وتدور القطع الصخرية الخشنة داخلها بفعل الدوامات الرأسية لتكون حفرا عميقة فى صخور القاع.
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتكون تعرية الصخور قوية خاصة عند الجنادل ومساقط المياه (الشلالات). والجنادل **rapids** مناطق فى مجرى النهر يكون التيار فيها أسرع من غيرها نتيجة زيادة مفاجئة فى انحدار المجرى، ولكن يكون الانحدار غير كاف لإحداث **مساقط مياه (شلالات) waterfalls** والتى تتكون عندما تكون الانحدارات شديدة جدا، حيث تساوى سرعة تحرك المياه حينئذ سرعة السقوط الحر. وتتسبب سرعة الماء والاضطراب الكبير فى تكسر الكتل الكبيرة إلى قطع صغيرة وتُحمل بعيداً بواسطة التيار القوى.

ويتميز نهر النيل شمال الخرطوم بوجود كثير من الجنادل rapidsوالتى تسمى بالشلالات cataracts وعددها ستة ، يوجد آخرها عند أسوان . وجدير بالملاحظة أن تسمية تلك الجنادل بالشلالات فيه شيء من التجاوز ، وأنه لا توجد مساقط للمياه وإنما هى مواضع من النهر يشتد فيها انحدار مجراه وتعترضها صخور صلبة وجنادل . وتشغل تلك الشلالات 565 كم من مجرى النيل حيث ينخفض المجرى 192 مترا ويكون الانحدار 3000:1 .

جـ. التقوض الناشئ عن تأثير التيارات

يؤدى تصادم الكميات الضخمة من الماء المندفع بسرعة كبيرة وبها الجلاميد المتحركة إلى تعرية طبقات الصخور بسرعة عند قيعان المساقط المائية . وتسبب المساقط المائية أيضاً تعرية الصخور الموجودة تحتها والمكونة للجرف الذى يكوّن المساقط . ويعمل تقويض undercutting هذه الجروف بالتعرية على انهيار الطبقات العليا وتراجع المساقط نحو المنابع. وتكون التعرية بالمساقط المائية أسرع عندما تكون طبقات الصخر فى وضع أفقى ، وتكون الصخور المقاومة للتعرية عند قمة المسقط المائى بينما تكون الصخور اللينة مثل الطفل عند أسفله . وتوضح الوثائق التاريخية أن الجزء الرئيسى لشلالات نياجرا ، وهى أشهر المساقط المائية فى شمال أمريكا ، يتحرك فى اتجاه منبع النهر بمعدل متر واحد كل عام .

V. حمولة المجارى المائية

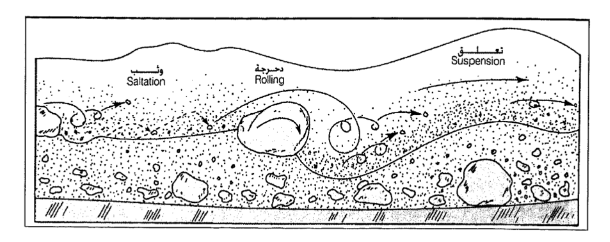
تتكون النسبة الصلبة من حمولة المجارى المائية من جزأين: يسمى الجزء الأول منهما **حمولة القاع bed load** ويتكون من الحبيبات الخشنة التى لا يقدر المجرى على حملها ، فيقوم بدفعها أو دحرجتها على قاع المجرى ، أما الجزء الثانى فيسمى **الحمولة المعلقة suspended load** ويتكون من الحبيبات الدقيقة التى تكون معلقة فى الماء وغير ملامسة لقاع المجرى . وحين تترسب هذه الحبيبات الصلبة فإنها تكوّن طميا alluvium ، ويشمل الطمى أى راسب فتاتى غير متماسك ترسب من مجرى مائى . كما تحمل المجارى المائية أيضا مواد ذائبة تسمى **الحمولة الذائبة dissolved load** وهى مواد تكونت أساسا نتيجة التجوية الكيميائية .

أ. حمولة القاع

تتراوح حمولة القاع عموما ما بين 5 إلى 50 ٪ من الحمولة الكلية لمعظم المجارى المائية. وتتحرك مكونات حمولة القاع بسرعة أقل من سرعة المجرى المائى ، لأن المكونات لا تتحرك بسرعة ثابتة ، ولكن تتحرك المكونات بطريقة متقطعة حيث تُدفع أو تتدحرج الحبيبات على قاع المجرى المائى . وعندما تكون القوى كافية لرفع حبيبة ، فإنها قد تتحرك مسافة قصيرة بالوثب ، وهى حركة وسط بين الدحرجة والتعليق . ويشمل الوثب (القفز) **saltation** حركة الحبيبة إلى الإمام فى قفزات قصيرة متتابعة على امتداد مسارات مقوسة (شكل 21.12) . ويستمر القفز طالما كانت التيارات فى حالة مضطربة بدرجة كافية لرفع الحبيبات وحملها فى اتجاه المصب . ويرتبط توزيع رواسب حمولة القاع فى قناة المجرى المائى بتوزيع السرعة ، حيث يتركز الراسب الخشن الحبيبات عند نطاقات السرعة العالية ، بينما يبتعد الراسب الدقيق الحبيبات إلى نطاقات السرعة البطيئة .

1. الركيزة (المرقد أو رواسب حصوية مكانية)

حدث الاندفاع الشهير للبحث عن ذهب كاليفورنيا عام 1849م بعد اكتشاف كسرات صغيرة من الذهب فى الرمال والحصى الموجودة فى قاع مجرى مائى صغير . وقد عُثر على حصى حامل للذهب فى



شكل (21.12): تتحرك حمولة القاع bed load فى المجرى المائى بعدة طرق. فالحبيبات الكبيرة التى لايستطيع الماء حملها تتحرك بالانزلاق أو الدحرجة أو الوثب . ويحدث الوثب فى المناطق التى يصل فيها اضطراب الماء إلى القاع ، أو حين تصطدم الحبيبات المعلقة بالحبيبات الأخرى على القاع . وعندما ترتفع الحبيبات فى الماء المنساب فإنها تنتقل على امتداد مسارات مقوسة بينما تعمل الجاذبية على هبوط الحبيبات إلى قاع المجرى المائى، حيث تصطم بحبيبات أخرى ، مما يؤدى إلى تحركها هى الأخرى .

(After Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis).

مناطق أخرى كثيرة فى جميع أنحاء العالم . وأحيانا يكون الحصى نفسه غنيا بالذهب بدرجة تكفى لاستخراجه منه . أما إذا كانت نسبة الذهب ضعيفة ، فإن ذلك يكون دليلا على وجود مصدر ما للذهب فى اتجاه منبع المجرى المائى . وقد اكتُشف عديد من مناطق التعدين فى العالم بعد تتبع أثر الذهب أو أى معادن أخرى فى اتجاه منبع المجرى المائى حتى الوصول إلى مصادر المعادن فى العروق فى صخر الأساس .

ويتركّز الذهب أو أى حبيبات معدنية ثقيلة بالتركيز الميكانيكى للحبيبات الثقيلة. فمعدن الذهب النقى يكون ثقيلا (كثافته النوعية=19)، لذلك فإنه يترسب من حمولة القاع بسرعة كبيرة جدا، بينما يتحرك الكوارتز بعيدا (كثافته النوعية=2.65). وحيث إن معظم معادن السيليكات خفيفة عند مقارنتها بالذهب، فإن حبيبات الذهب تتركز ميكانيكيا فى الأماكن التى تكون فيها سرعة الانسياب فى المجرى المائى عالية بدرجة تكفى لإزالة الحبيبات الخفيفة، ولكنها ليست عالية بدرجة تكفى لإزالة الحبيبات الثقيلة. ويحدث هذا التركيز خلف حواجز صخرية أو فى حفر صخر الأساس bedrock على امتداد قناة المجرى المائى تحت المساقط المائية، أو فى الجزء الداخلى من المنعطفات، وفى اتجاه مصب المجرى المائى فى المنطقة التى يدخل فيها رافد مجرى مائى رئيسى، أو عند مصبات الأنهار فى البحار. ويسمى الراسب المكون من المعادن الثقيلة والتى تم تركيزها ميكانيكيا بالركيزة **placer** (المرقد أو رواسب حصوية مكانية). وتكون العديد من المعادن الفلزية رواسب ركيزة، وهى تشمل معادن تتواجد كفلزات نقية مثل البلاتين والنحاس ، بالإضافة إلى معدن خام القصدير (كاسيتريت SnO_2) ومعادن غير فلزية مثل الماس والياقوت ruby (نوع من الكورندم أحمر شفاف) والسفير (نوع من الكورندم أزرق شفاف). ولكى يتم تركيز المعادن فى الركيزة ، فلا يكفى أن تكون المعادن ثقيلة ، ولكن يجب أن تكون أيضا مقاومة لعوامل التجوية الكيميائية وليست معرضة لأن تتشقق بسهولة حيث إن حبيبات المعدن تتحرك (تتشقلب) فى المجرى المائى فى كافة الاتجاهات .

ب. الحمولة المعلقة

ترجع الخاصية الطينية إلى كثير من المجارى المائية إلى وجود حبيبات دقيقة من الغرين والصلصال تتحرك وهى معلقة . وتأتى معظم الحمولة المعلقة من الحطام الصخرى (الأديم) regolith دقيق الحبيبات والذى غُسل من مناطق غير محمية بالنباتات ، ومن الراسب الذى تم تعريته ونقله من ضفتى المجرى المائى بواسطة المجرى ذاته . فمثلا يرجع اللون الأصفر لنهر الصين الأصفر (أو هوانج هى Huang He) إلى الحمولة الكبيرة من الغرين الأصفر . وقبل إنشاء السد العالى بأسوان بمصر كان لون نهر النيل يتغير إلى اللون البنى لاحتوائه على نسبة عالية من الغرين والصلصال .

وتميل حبيبات الغرين والصلصال لأن تبقى معلقة فى الماء المضطرب فترة أطول منها فى المياه غير المضطربة، حيث تزيد سرعة التيارات المتحركة لأعلى فى المجرى المائى المضطرب عن السرعة التى يتم عندها ترسيب هذه الحبيبات من الغرين والصلصال تحت تأثير الجاذبية . ويحدث الاستقرار والترسيب فقط حين تنخفض السرعة ويتوقف الاضطراب ، مثلما يحدث فى بحيرة أو بحر .

جـ. الحمولة الذائبة

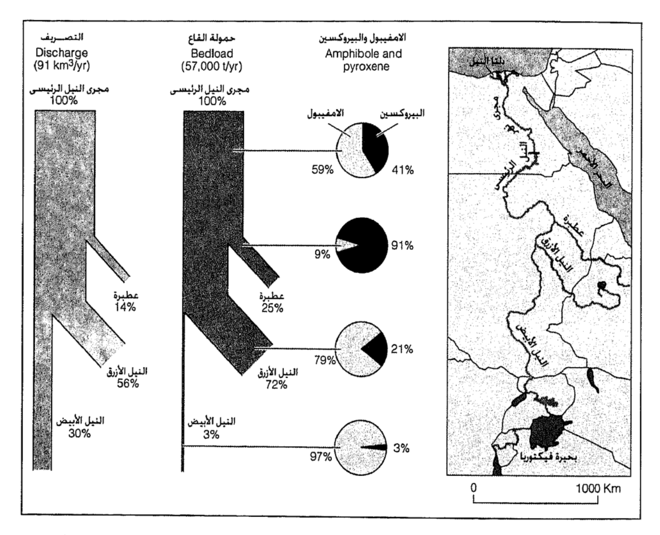
تحتوى مياه كل المجارى المائية ، حتى أكثرها شفافية وصفاء ، على مواد كيميائية مذابة تكوّن جزءا من حمولة المجرى المائى . وتكوّن سبعة أيونات فقط كل المحتوى المذاب فى معظم الأنهار وهى البيكربونات (HCO_3^{1-}) والكالسيوم (Ca^{2+}) والكبريتات (SO_4^{2-}) والكلوريد (Cl^{1-}) والصوديوم (Na^{1+}) والماغنسيوم (Mg^{2+}) والبوتاسيوم (K^{1+}) . وعلى الرغم من أن الحمولة المذابة فى بعض المجارى المائية تكوّن نسبة صغيرة فقط من الحمولة الكلية ، إلا أنه فى بعض المجارى المائية الأخرى تكون نسبته أعلى من النصف . وعموما ، فإن نسبة الحمولة المذابة فى المجارى المائية التى تتلقى إمدادات كبيرة من المياه الجوفية تكون أعلى منها فى المياه التى تأتى أساسا من الماء الجارى على سطح الأرض .

د. التغير فى حجم الحبيبات وتركيب الرواسب فى اتجاه مصب النهر

يرتبط حجم الحبيبات التى يمكن للمجرى المائى أن ينقلها بسرعة الانسياب . لذلك ، فإنه من المفترض أن يزيد متوسط حجم الرواسب فى اتجاه مصب مجرى النهر بسبب زيادة سرعة جريان الماء ، ولكن مايحدث فى الواقع هو أن حجم الحبيبات يقل فى اتجاه مصب مجرى النهر. ويرجع سبب هذه النتيجة غير المتوقعة إلى عمليتى الفرز sorting والبرى abrasion ، حيث تنساب روافد المجارى المائية للأنهار الكبيرة فى المناطق الجبلية فى قنوات تتغطى أرضيتها بحصى خشن قد يشمل جلاميد كبيرة . وحيث أن الرواسب دقيقة الحبيبات تتحرك بسهولة ، حتى بواسطة المجارى المائية ذات التصريف المنخفض ، لذلك فإنها تُحمل بعيداً بالمجارى المائية الصغيرة فى المناطق الجبلية لمنابع الأنهار، تاركة الرواسب خشنة الحبيبات خلفها . ومع مرور الوقت ، فإن حمولة القاع الخشنة تقل تدريجيا فى الحجم نتيجة البرى والتصادم أثناء الحركة ببطء على امتداد القاع . وفى النهاية ، وعندما يصل المجرى المائى للبحر، تكون حمولة القاع قد تكوّنت أساساً من رواسب لا يزيد حجم الحبيبات فيها عن حجم الرمل .

أما بالنسبة للتغير فى تركيب الرواسب فى اتجاه مصب النهر ، فإنه من المعروف أن المجارى المائية الكبيرة تقطع صخوراً منكشفة من مختلف الأنواع ، لذلك فإن حمولة المجرى المائى يتغير تركيب الرواسب فيها على امتداد قناة المجرى المائى ، حيث تضاف رواسب من مختلف الأنواع . ويقدم نهر النيل مثالاً جيداً لذلك ، حيث يضم مجرى نهر النيل الرئيسى

خلال جريانه من الجزء الجنوبى بمصر إلى الدلتا ماءً يرد إليه من ثلاثة روافد رئيسية هى النيل الأبيض والنيل الأزرق ونهر عطبرة (شكل 22.12). ويساهم النيل الأبيض بحوالى ثلث التصريف الكلى total discharge تقريباً، وحوالى 3٪ من حمولة الرواسب فى مجرى النيل الرئيسى. وتساوى نسبة معدن الأمفيبول (والذى جُوِّى من الصخور المتحولة فى هضبة وسط أفريقيا) إلى البيروكسين حوالى 3:97، أما النيل الأزرق الذى يصرف المرتفعات الأثيوبية فإنه يساهم بأكثر من نصف التصريف الكلى، وحوالى ثلاثة أرباع حمولة القاع. وتكون نسبة الأمفيبول:البيروكسين حوالى21:79، مما يعكس طبيعة الصخور البركانية لمنطقة المنبع. ويساهم نهر عطبرة بحوالى 14٪ من التصريف وحوالى ربع حمولة القاع. ويسود معدن البيروكسين فى هذا المجرى المائى حيث تبلغ نسبة الأمفيبول إلى البيروكسين 9: 91. وتختلط هذه النسب



شكل (22.12): التغير فى تركيب الرواسب على امتداد نهر النيل، حيث تؤدى مساهمات الروافد من المعادن المختلفة فى تغيير تركيب الرواسب فى مجرى النهر الرئيسى.

أ) خريطة لنهر النيل وروافده الرئيسية

ب) التصريف discharge وحمولة القاع bed load ونسبة الأمفيبول/ البيروكسين فى نهر النيل وروافده الرئيسية. ويساهم نهر النيل الأزرق الذى ينشأ من المرتفعات الأثيوبية بأكبر نسبة من التصريف وحمولة القاع.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

المختلفة من المعادن مع بعضها عند دخولها المجرى الرئيسى للنيل لتعطى نسبة أمفيبول : بروكسين 41:59 . وتعكس هذه النسبة بدرجة كبيرة الإضافة الرئيسية لراسب غنى بالأمفيبول من النيل الأزرق ، والذى يؤثر على الراسب فى مجرى النيل الرئيسى .

VI. رواسب المجارى المائية

عندما يفقد مجرى مائى طاقة حركته نتيجة التغير فى الانحدار أو السرعة أو التصريف، تضعف قدرته على النقل ، ويرسب جزءاً من حمولته . وتتكون رواسب مميزة فى المجارى المائية على امتداد حواف قناة المجرى وقيعان الوادى ومقدمات الجبل وحافة البحيرة أو المحيط ، حيث إنها تمثل الأماكن التى تحدث فيها تغيرات فى طاقة المجرى المائى .

أ. السهول الفيضية والجسور الطبيعية

عندما يرتفع منسوب الماء فى المجرى المائى أثناء فيضان عال ، فإن الماء يفيض ويغمر ضفتى المجرى ويغرق **السهل الفيضى floodplain** المجاور ، وهو جزء مسطح مستوى من وادى المجرى المائى تغمره مياه الفيضان . وقد يتكون عند الحد بين قناة المجرى المائى وسهل الفيضان **جسر طبيعى natural levee** (شكل 16.12) ، وهو أرض مرتفعة نسبياً وتدية الشكل ، تمتد فى مساحة ضيقة على طول حافة قناة المجرى ، وهو يمثل أعلى جزء فى السهل الفيضى . ويتكون الجسر الطبيعى عندما يفيض الماء المحمل بالرواسب خارج قناة المجرى المائى المغمورة تماما أثناء الفيضان ، حيث يحدث نقص مفاجئ فى السرعة والعمق والاضطراب عند حواف القناة . ويؤدى النقص المفاجئ فى العوامل السابقة إلى ترسيب الجزء الخشن من الحمولة المعلقة (عادة رمل ناعم وغرين خشن) على امتداد مساحة طولية ضيقة (شقة) على حواف القناة ليتكون بهذه الطريقة الجسر الطبيعى ، بينما يترسب بعيداً الغرين الأدق حجما والصلصال فى الماء الساكن الذى يغطى السهل الفيضى .

وقبل بناء السد العالى بأسوان كان الغرين المترسب فى أوقات الفيضان يغطى السهل الفيضى لنهر النيل . ويبلغ أقصى عرض للسهل الفيضى 23 كم عند مدينة بنى سويف ، بينما لا يوجد سهل فيضى عند أسوان . ويزداد عرض السهل الفيضى عموما كلما اتجهنا شمالا (جدول 1.12) . ويلاحظ أن عرض السهل الفيضى غير متماثل على جانبى مجرى نهر النيل، وأنه عموما أعرض على الجانب الغربى عنه على الجانب الشرقى ، فيما عدا منطقة قنا .

ب. الشرفات (المصاطب النهرية)

تشتمل معظم وديان المجارى المائية على امتدادات طولية من الأرض على جانب النهر، تكون على هيئة مصاطب طمية مستوية أعلى السهل الفيضى تعرف بالشرفات (شكل 23.12). وتوجد عادة شرفة مزدوجة واحدة على كل جانب من جوانب المجرى المائى ، ويكون منها فى الغالب عدة أزواج ومجرى النهر محصور بين الزوج الأسفل منها . **والشرفة (المصطبة النهرية)terrace** هى بقايا سهل فيضى مهجور ، وتتكون عموما من رواسب الفيضان .

جدول (1.12): عرض ومنسوب السهل الفيضى Floodplain لنهر النيل بمصر

المنطقة	خط العرض	المنسوب بالأمتار (فوق مستوى سطح البحر)	عرض السهل		
			الجانب الغربى	الجانب الشرقى	العرض الكلى
أسوان	24° 05'	92-91	0.0	0.0	0.0
إدفو	25° 00'	84 - 82	4.0	2.0	6.0
قنا	26° 10'	81-72	1.0	8.0	9.0
أسيوط	27° 10'	52-51	7.0	1.0	8.0
المنيا	28° 05'	40-39	11.0	1.5	12.5
بنى سويف	29° 05'	29-28	22.0	1.0	23.0
القاهرة- الجيزة	30° 00'	20-18	10.5	2.0	12.5

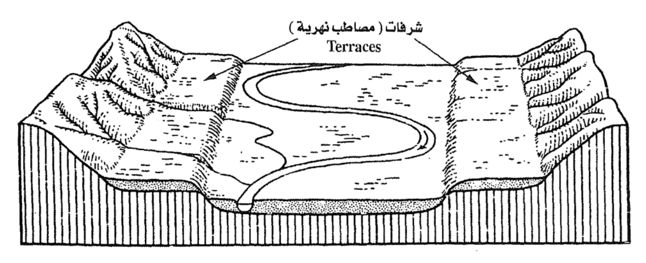
(After Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, vol. 1. The Egyptian Geographic Soc., Cairo).

ويبدأ تكوّن الشرفات عندما يكوّن المجرى المائى سهلا فيضيا . وقد يحدث تغير فى توازن المجرى المائى مما يؤدى لأن يقطع المجرى المائى السهل الفيضى عند مستوى أقل انخفاضا ، حتى يصل إلى مستوى لا يستطيع الفيضان فيه أن يصل إلى السهل الفيضى السابق. ويعيد المجرى المائى توازنه مرة أخرى عند المستوى المنخفض . وقد يكوّن المجرى المائى سهلا فيضيا آخر ، يؤدى إلى تكون زوج آخر من الشرفات المنخفضة .

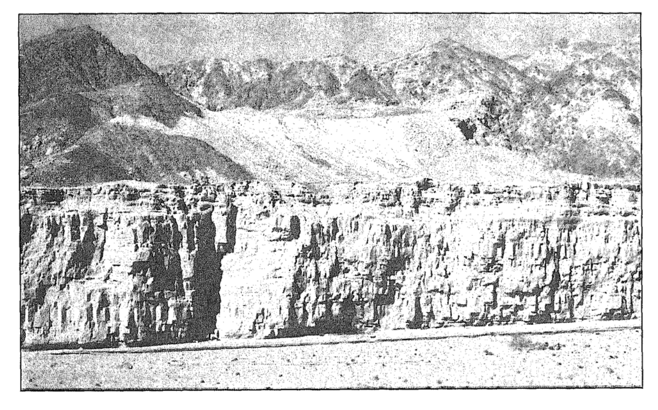
وقد أوضحت الدراسات وجود سلسلة من الشرفات على جانبى وادى النيل مكونة من الحصى . وقد كونت الأنهار المتعاقبة الشرفات منذ زمن البليوسين المتأخر . هذا ولم تحفظ شرفات نهر النيل فى كل مكان على جانبى الوادى . وقد أزيلت بعض هذه الشرفات بالأنهار المتعاقبة ، بينما لم يتكون بعضها الآخر من البداية .

ج. المراوح الطمية (الفيضية)

عندما تنساب مجارى مائية فى وديان ضيقة وشديدة الانحدار فى المناطق الجبلية ، ثم تنبثق فجأة إلى وديان منبسطة القاع نسبيا أو مناطق سهلية ، فإنه يحدث تغير فى الظروف عند مقدمة الجبل وتترسب على امتداد هذه المقدمة كميات كبيرة من الرواسب على هيئة تراكمات مروحية أو مخروطية الشكل ، تسمى مراوح طمية (فيضية) **alluvial fans** (شكل 24.12). وينتج هذا الراسب عن الانخفاض المفاجئ فى سرعة جريان الماء بسبب اتساع عرض المجرى المائى كثيرا وانخفاض شدة الانحدار عند مقدمة الجبل . وتأخذ المروحة الطمية (الفيضية) شكلا محدبا لأعلى يصل بين الجزء المنحنى الذى يمثل أشد انحدارًا للجبل من ناحية ومنحنى الوادى اللطيف الانحدار أو السهول من ناحية أخرى . وتسود المواد الخشنة من الجلاميد إلى الرمل على المنحدرات الحادة العلوية من المروحة ، بينما تتكون الرواسب السفلية من رمال أكثر دقة وغرين وصلصال . وقد تتكون على مقدمة الجبل مراوح طمية (فيضية) أخرى من مجارى مائية مجاورة تتصل معا لتكوّن مايسمى بالبهادا bajada والتى تمتد عند حضيض الجبال بشكل طولى . مثال ذلك النطاق الذى يمتد عند أقدام جبال الصحراء الشرقية فى مصر مكونا الحد الشرقى للسهل الفيضى . وتكون هذه المناطق غنية بالمياه الجوفية نظرا لوجودها عند مخارج الأودية من ناحية وخشونة رواسبها من ناحية أخرى .



أ



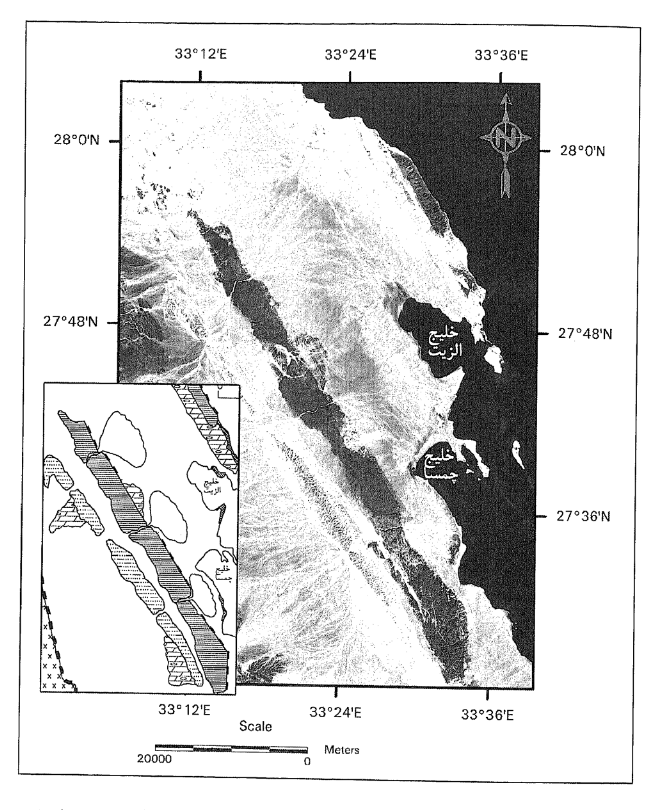
ب

شكل (23.12): الشرفات (المصاطب النهرية) terraces

أ) شرفات (مصاطب نهرية) terraces المجرى المائى ، وهى مصاطب طمية (فيضية) تغطى صخر الأساس bedrock ، وتتكون عندما يقطع المجرى المائى سهلا فيضيا ، ويمثل السطح العلوى للشرفات النهرية قاع واد سابق . وتكون مزدوجة عادة على جانبى المجرى المائى .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ب) الشرفات (المصاطب النهرية) ، غرب نويبع – سيناء – مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية – مصر).

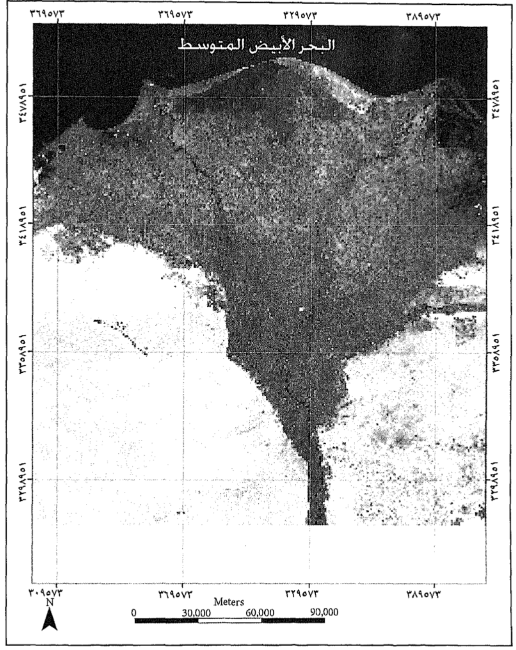


شكل (**24.12**): صورة فضائية لثلاث مراوح فيضية alluvial fan متماثلة تكونت نتيجة النقص المفاجئ في سرعة جريان الماء بسبب اتساع المجرى المائى وقلة شدة الانحدار عند مقدمة الجبل على امتداد الحد الشمالى الشرقى لجبال عش الملاحة – الصحراء الشرقية – بمصر .

د. الدلتاوات

عندما تنساب الأنهار أو المجارى المائية عموماً فى مياه البحار أوالمحيطات أو البحيرات فإنها تختلط مع المياه المحيطة وتنخفض سرعتها بدرجة كبيرة وتفقد تدريجيا طاقة حركتها . وتستطيع بعض الأنهار الكبيرة مثل الأمازون والمسيسيبى أن تحتفظ ببعض التيارات لعدة كيلومترات فى البحر ، بينما تختفى تقريباً تيارات بعض الأنهار مثل نهر النيل عند المصب مباشرة ، حيث تصطدم بالأمواج القوية .

وتتلاشى تدريجيا تيارات المجرى المائى عندما تلتقى بمياه البحر أو البحيرة وتفقد قدرتها على نقل الرواسب كلما تقدمت إلى الأمام ، وتبدأ حمولة النهر فى الترسب حسب حجم الحبيبات من الخشن إلى الناعم . فتبدأ الرمال الخشنة فى الترسب أولاً عند المصب تليها الرمال الدقيقة الحبيبات ثم الغرين فالصلصال بعيدا عن الشاطئ . وتكوّن كل هذه الأحجام المختلفة من

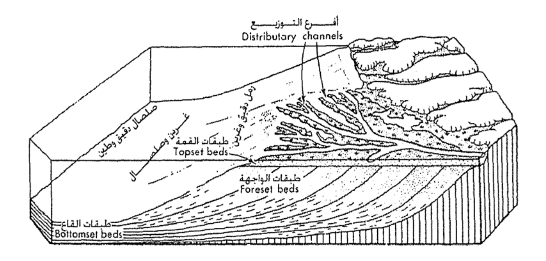


شكل (25.12): صورة فضائية لدلتا نهر النيل - مصر.

المواد المترسبة جسماً مسطحاً تقريباً (رصيف ترسيبى) عند مصب المجرى المائى على قاع البحر أو البحيرة الذى ينحدر نحو المياه العميقة بعيداً عن الشاطئ . ويشبه هذا الجسم المسطح المثلث أو المروحة ويطلق عليه مصطلح دلتا **delta** . ويرجع اسم الدلتا إلى المؤرخ اليونانى هيرودوت الذى زار مصر حوالى سنة 450 قبل الميلاد ، وأطلق هذا الاسم على الشكل شبه المثلث لدلتا نهر النيل لتشابهه مع الحرف اليونانى دلتا (Δ) . وتستمد كل الدلتاوات الأخرى فى العالم اسمها من دلتا نهر النيل (شكل 25.12) .

وكما سبق أن أوضحنا ، فإن ماء النهر المندفع عندما يلتقى بماء البحر أو البحيرة فإن حبيبات حمولة القاع تترسب أولاً ، ثم تتبعها الرواسب العالقة . ولذلك ، تتدرج الطبقة التى تمثل حدثًا ترسيبيًّا واحدًا (مثل فيضان واحد) من رواسب خشنة عند مصب النهر إلى رواسب أدق فى حجم الحبيبات بعيداً عن الشاطئ . ويؤدى تراكم عديد من الطبقات المتتابعة إلى تكوين سد أو جسر ينمو باطراد ناحية البحر (شكل 26.12). ويسمى الجزء السميك من الطبقة المترسبة من الدلتا والمنحدر بشدة والذى يتميز بحبيباته الخشنة **بطبقة الواجهة foreset bed** . وتتغير سحنة هذه الطبقة لتصبح حبيباتها أدق حجما كلما تحركنا من الشاطئ ناحية البحر ، ويغطى هذا الجزء من طبقة الدلتا مساحة واسعة من القاع ، ويطلق عليه **طبقة القاع bottomset bed** .

ومع استمرار الترسيب تنمو الدلتا للخارج ، حيث تتراكب طبقات الواجهة الخشنة الحبيبات فوق طبقات القاع دقيقة الحبيبات . وهكذا ، تمتد قناة النهر تدريجيا للخارج لتتراكب فوق الدلتا النامية . وتسمى كل من الرواسب خشنة الحبيبات والرواسب دقيقة الحبيبات المترسبة بين القنوات **بطبقات القمة topset beds**. وتتراكب طبقات القمة والتى تكون فى وضع أفقى تقريباً فوق طبقات الواجهة فى الدلتا (شكل 26.12).

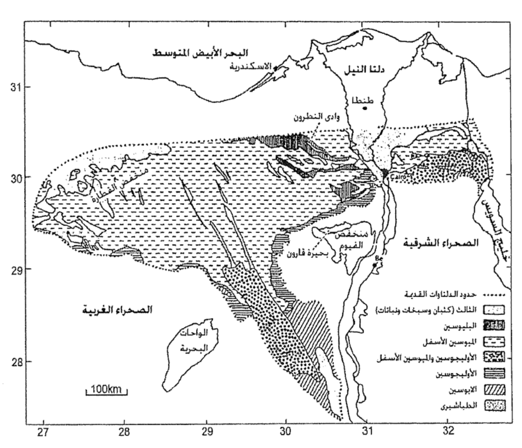


شكل (**26.12**): دلتا بحرية نموذجية
يعرف الجزء السميك المنحدر بشدة للخارج فى كل طبقة من طبقات الدلتا والذى يتكون من حبيبات خشنة (الرمل) بطبقة الواجهة **foreset bed** . وعند تتبع الطبقة نفسها فى اتجاه البحر فإنها تصبح أقل سمكا ، كما تصبح حبيباتها أدق حجما (غرين وصلصال) وتغطى مساحة كبيرة من قاع البحر ، ويسمى هذا الجزء من الطبقة فى الدلتا والذى ينحدر بلطف بطبقة القاع **bottomset bed** . وتتراكب فوق طبقات الواجهة رواسب خشنة ودقيقة الحبيبات تعرف بطبقات القمة **topset beds** .
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وعندما يقترب النهر من مصبه عند الدلتا ، حيث يكون الانحدار مستويا تقريباً مع مستوى سطح البحر، فإن نمط الصرف ينعكس ، أى تتحول من تجميع المزيد من الماء من الروافد tributaries ، إلى تكوين نمط أفرع التوزيع **distributaries**، والذى يكون عبارة عن أنهار صغيرة تتفرع من القناة الرئيسية إلى المصب . وهكذا تستقبل أفرع التوزيع الماء والرواسب من القناة الرئيسية وتوزعها فى عدة قنوات – أى أنها تعمل عكس عمل الروافد .

وقد كون عديد من الأنهار الكبيرة فى العالم دلتاوات ضخمة عند مصباتها ، مثل أنهار النيل والأمازون والمسيسيبى. ولكل دلتا مميزاتها الخاصة ، والتى تحددها بعض العوامل مثل تصريف النهر وطبيعة وحجم الحمولة وشكل صخر الأساس الساحلى بالقرب من الدلتا وطوبوغرافية المنطقة المغمورة على مسافة من الشاطئ وشدة واتجاه التيارات والأمواج . وتنقل معظم الأنهار والمجارى المائية الكبيرة كميات ضخمة من الرواسب العالقة الدقيقة إلى البحر .

ومن الظواهر المهمة فى تكوين الدلتاوات تغير المجرى الكلى للنهر. فإذا لم تستطع أفرع النهر الوصول إلى المحيط بسبب نقص الانحدار وقدرة النهر على الانسياب التدريجى ، فإن النهر يبدأ فى تحويل مساره إلى مجرى جديد أقل طولا ، وينقل هذا المجرى الجديد بالتالى الرواسب إلى الموضع الجديد . ونتيجة لهذا التغير، فإن الدلتا قد تنمو فى مكان ما لمئات أو لآلاف



شكل (**27.12**): دلتا الأوليجوسين فى الجزء الأوسط من الصحراء الغربية .

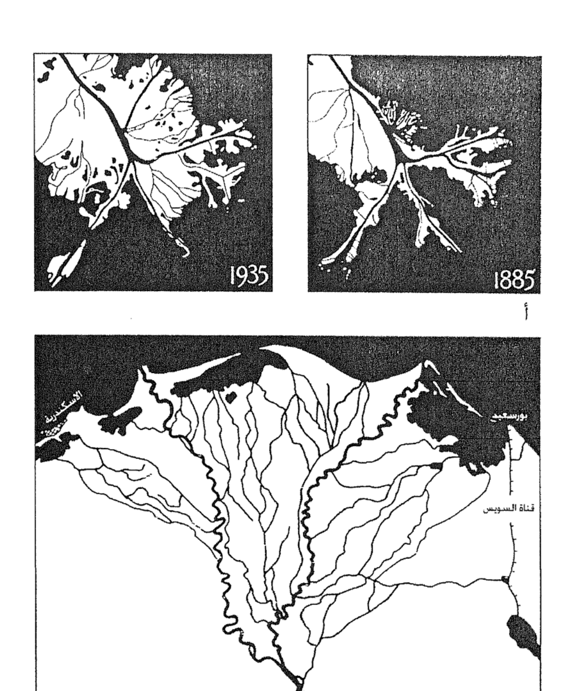
(After Abdel-Rahman, M.A. and El-Baz, F., 1979: Deposition of a probable ancestral delta of the Nile River, in Apollo-Soyuz Test Project, V. II, Earth observations and photography (Editors: F. El-Baz and D.M. Warner) NASA, Washington DC, pp. 511-520.

السنين ، ثم تتحول إلى موضع جديد وتبدأ فى النمو فى اتجاه آخر . وتكوّن الأنهار الكبيرة ، مثل نهر المسيسيبى أو نهر النيل ، دلتاوات كبيرة تبلغ مساحتها عدة آلاف من الكيلومترات المربعة. وقد نمت دلتا المسيسيبى مثل عديد من دلتاوات الأنهار الكبيرة الأخرى خلال ملايين السنين ، حيث بدأت فى التكون منذ حوالى 150 مليون سنة مضت . وقد تغير موضع دلتا المسيسيبى خلال الستة آلاف سنة الماضية. كما تغير موضع دلتا النيل أيضا كما سنوضح فيما بعد . كما نشأت بعض الدلتاوات فى مصر لأنهار سابقة لنهر النيل وغيرت موضعها أيضا . فقد أوضحت الأبحاث الحديثة أنه كان يجرى على أرض الصحراء الغربية بمصر منذ الأوليجوسين عدة أنظمة نهرية وليس نظاما نهريا واحدا ، والتى تعرف بالأنهار أسلاف النيل Nile Ancestors . فقد نشأ فى حين الأوليجوسين نظاما نهريا ينساب فى اتجاه شمال غرب ، حيث كون رواسب دلتاوية فى الجزء الأوسط من الصحراء الغربية (شكل 27.12) . ثم سادت ظروف مشابهة لتلك الظروف أيضا فى حين الميوسين المبكر والأوسط . وقد أدى تكون ذلك إلى تكون دلتا ضخمة فى الجزء الشمالى من منخفض الفيوم ، كانت أكبر كثيرا من دلتا النيل الحالية، مما يدل على أن النهر كان قويا (شكل 27.12). وعلى الرغم من تحديد تلك الدلتاوات ، إلا أنه من الصعب التعرف على أثر مجارى الأنهار التى كونت تلك الدلتاوات ، حيث محيت وأزيلت كلية بالتجوية والتعرية فى الميوسين ، باستثناء القليل من الأودية التى حفظت منها.

أمثلة من الدلتاوات الحديثة

يوضح شكل (28.12) أنواعًا مختلفة من الدلتاوات، حيث يتحكم فى كل دلتا توازن محدد بين قوى الترسيب والعمليات البحرية مثل الأمواج والدوامات . ويسود فى دلتا المسيسيبى عمليات الترسيب النهرية (شكل 28.12 أ) ، حيث تُغذَى الدلتا بنظام نهرى ضخم يقوم بصرف جزء كبير من شمال أمريكا ، ويبلغ تصريف حمل التصريف السنوى حوالى 454 مليون طن مكعب سنويا. وينحصر نهر المسيسيبى عموماً فى قناته على طول مساره باستثناء فترات الفيضان العالية. وتصل معظم رواسبه إلى المحيط عبر قنوات فرعين أو ثلاثة أفرع ، والتى امتدت بسرعة بعيداً فى خليج المكسيك. ويطلق على هذا الامتداد دلتا قدم الطائر **bird-foot delta** .

وتختلف دلتا النيل بمصر عن دلتا المسيسيبى فى عدة جوانب . فبدلاً من أن يكون النهر محصورا فى قناة واحدة ، فإن نهر النيل يبدأ فى التفرع عند القاهرة (قبل 160 كم من البحر) ثم يكوّن شكل المروحة على طول امتداد الدلتا (شكل 28.12 ب) . وقد كان للنيل تسعة أفرع ثم أصبحت سبعة وأخيرا اقتصرت على فرعى دمياط ورشيد . وقد أعادت أمواج البحر المتوسط القوية توزيع الرواسب عند واجهة الدلتا . وتكوّن هذه الرواسب التى أعيد ترسيبها مجموعة من الحواجز المقوسة التى تحجز أجزاء من البحر لتكوّن بحيرات شاطئية lagoons . وتقوم البحيرات الشاطئية بدور مهم فى تكوين بيئة ترسيب تمتلئ برواسب دقيقة الحبيبات . ويرجع الاختلاف بين دلتا النيل ودلتا المسيسيبى إلى التوازن بين تدفق الرواسب ، والذى يقوم بتكوين دلتا قدم الطائر ، وبين قوة تأثير الأمواج التى تعيد ترسيب الرواسب لتكوين حواجز . وتقدم دلتا النيجر أوضح مثال على التوازن بين قوة الترسيب وفعل الأمواج وتيارات المد والجزر ، ولذلك فإن دلتا النيجر تكون متماثلة بشكل لافت للنظر .



ب

شكل (28.12): أشكال بعض الدلتاوات المعروفة

أ) شكل يوضح نمو دلتا المسيسيبى خلال فترة خمسين سنة ، وهى مثال تقليدى لدلتا قدم الطائر bird- foot delta .

ب) دلتا نهر النيل (يظهر الشكل بعض أفرع الدلتا القديمة) ، وهى مثال تقليدى للدلتا القوسية . arcuate delta ويظهر فى الشكل بعض أفرع الدلتا القديمة .

(After Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Societv and Nelson. Great Britain).

VII. أنظمة الصرف

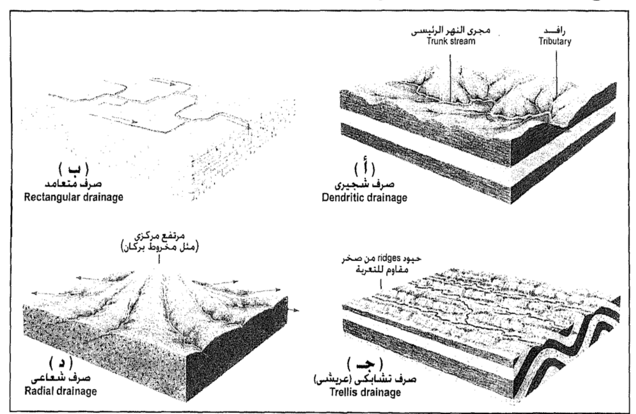
يعتقد بعض سكان المدن ، والذين اعتادوا على بيئة بها منشآت صناعية ، أن الطبيعة ينقصها النظام أو النمط الواضح . وفى الحقيقة ، فإن الطبيعة يحكمها نظام محكم ، حيث لاتتوزع المجارى المائية على سطح الأرض عشوائياً ، وإنما تترتب فى أنظمة صرف معقدة، وتدلنا بعض هذه الأنظمة على الطبيعة الجيولوجية

وصفات الأرض من تحتها ، وكذلك تطور القارات .

أ. أحواض الصرف وخطوط تقسيم المياه

يُحاط كل مجرى مائى بحوض صرف drainage basin. وحوض الصرف هو المساحة الكلية التى تتجمع مياهها وأمطارها لتغذى المجرى المائى . ولكل مجرى مائى حدود عند أطرافه ، قد تكون بعيدة أو قريبة من مجراه ، تعرف بمقسم المياه **divide water**، وهى عادة جبال أو تلال مرتفعة تفصل بين حوض هذا المجرى المائى بروافده وحوض مجرى مائى آخر يجاوره. ويتراوح حجم هذه المقسمات بين تل منخفض يفصل بين جدولين صغيرين ومقسمات الماء القارية التى تفصل بين أحواض الصرف القارية الضخمة . ويتراوح حجم أحواض الصرف بين أقل من كيلومتر مربع واحد ومساحات شاسعة . وتصل مساحة حوض نهر النيل الضخم إلى حوالى مليونين وتسعمائة ألف كيلومتر مربع . وتقسم القارات عموما إلى أحواض صرف أساسية تفصل بينها مقسمات ماء أساسية . فقارة أفريقيا مثلا مقسمة إلى العديد من أحواض الصرف.

وتحتفظ معظم مقسمات المياه بأماكنها لفترات زمنية طويلة ، حيث يتم تعريتها لتكوّن حيودا منخفضة ، بينما تتغير أماكن المقسمات فى مناطق أخرى . فإذا كان أحد المجارى المائية على جانب مقسم مياه قادراً على تعرية ونقل الرواسب بسرعة أكبر بكثير من مجرى مائى على الجانب الآخر، فإن المقسم يتم تعريته بطريقة غير متساوية. وفى بعض الأماكن، ينفذ المجرى المائى الأكثر نشاطا خلال المقسم ليقوم بأسر كل أو جزء الرافد المجاور الأقل نشاطاً. وتعرف هذه الحالة



شكل (29.12): شبكات الصرف drainage networks النموذجية

أ) صرف شجيرى ب) صرف متعامد ج) صرف تشابكى (عريشى) د) صرف شعاعى

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

بالقرصنة النهرية **stream piracy**. ويتم خلال هذا الأسر أو القرصنة النهرية تحويل مياه نهر ما إلى مجرى نهر آخر له سرعة تعرية أكبر كما ذكرنا ، ويجرى فى مستوى أكثر انخفاضاً من النهر المأسور . وتحدث القرصنة النهرية بسبب وجود وديان ضيقة بمناطق لا تنساب خلالها أى مجارى مائية.

ب. أنماط الصرف

إذا نظرنا إلى أى خريطة توضح توزيع قنوات المجارى المائية الكبيرة والصغيرة والروافد والأنهار الأساسية ، فإننا سنجد أنها تحتوى على نظام من الارتباط يعرف بشبكات الصرف **drainage networks** أو أنظمة الصرف drainage systems. فإذا تتبعنا المجرى الرئيسى ، فسنجد أنه ينقسم إلى روافد أصغر فأصغر فى شبكات صرف توضح أنماط تفرع مميزة (شكل 29.12) . والتفرع صفة تميز الكثير من الشبكات التى تقوم بجمع أى مادة وتوزعها . فشبكة الدورة الدموية فى الإنسان تقوم بتوزيع الدم إلى الجسم فى نظام متفرع من الشرايين ، ثم تقوم بتجميعه مرة أخرى فى نظام من الأوردة .

وربما كانت أكثر الشبكات المتفرعة شيوعاً هى تلك الموجودة فى الأشجار . وتتبع معظم الأنهار نمط التفرع غير المنتظم نفسه والذى يسمى صرف شجيرى **dentritic drainage** (من الكلمة اليونانية dendron بمعنى شجرة) . وهذا النموذج العشوائى من نظم الصرف موجود فى المناطق التى يكون فيها صخر الأساس bedrock متجانسا ، مثل طبقات من الصخور الرسوبية فى وضع أفقى ، أو صخور نارية أو متحولة كتلية (خالية من التطبق أو الانفصام أو التورق) . ويتكون نظام الصرف المتعامد **rectangular drainage** من مجارى مائية تتميز بأن المصارف الرئيسية وروافدها بها عديد من الانحناءات المتعامدة ، حيث تتبع عادة كسورا أو فواصل فى صخر الأساس تقسمه إلى كتل مستطيلة الشكل تقريباً ، وهى التى تتبعها اتجاهات الوديان . وهناك نوع خاص من نظام الصرف المتعامد ، يعرف بنظام الصرف التشابكى (عريشى) **trellis drainage** . وفى هذا النظام، تكون الروافد الرئيسية متوازية وطويلة جدا مثل شجرة العنب الممتدة على تعريشة من الخشب، والتى يصب فيها روافد أصغر متعامدة عليها ومتوازية فيما بينها . وهذا النظام من الروافد يكون شائعاً فى المناطق التى تتبادل فيها مكاشف أحرف الصخور الرسوبية المطوية الصلبة مع أخرى رخوة يسهل تآكلها وتعرضها للتعرية لتكون أحزمة متوازية تقريباً . ومن أنظمة الصرف الأخرى نظام الصرف الشعاعى **radial drainage** وهو يتكون عندما تمتد المجارى المائية متباعدة عن بعضها البعض فى نظام شعاعى من نقط مركزية مرتفعة ، مثل مخروط البركان أو تركيب القبة .

جـ. أنماط الصرف والتاريخ الجيولوجى

تقدم العلاقة بين المجارى المائية وجيولوجية المنطقة معلومات عن التاريخ التركيبى لتلك المنطقة (شكل 30.12) . فقد يتبع مسار المجرى المائى انحدار سطح الأرض ويعرف بالمجرى الانحدارى **consequent stream** ، بينما يقع المجرى اللاحق subsequent stream على امتداد أحزمة الصخور الضعيفة أو يمتد فى مجرى تكوّن نتيجة تركيب جيولوجى . ويسير المجرى المناضل أو السالف **antecedent stream** على المرتفعات حيث يقطع صخور الأساس المكونة لها والمقاومة للتعرية ، بدلاً من الجريان على جوانب تلك المرتفعات . ويسمى هذا المجرى ملتزما لوجوده قبل

طوبوغرافية المنطقة. أما المجرى المتراكب superposed stream فإنه مجرى مائى نحت مجراه عبر مجموعة من الصخور حتى وصل إلى مجموعة أخرى تحتها تختلف فى خواصها الصخرية أو التركيبية. وقد تحدد نمط الصرف الأصلى للمجرى المائى عند نحته للمجموعة العلوية وليس تبعاً للمجموعة التى ينساب الآن خلالها. فقد تكون صخور المجموعة العلوية متجانسة لتكوّن نظام الصرف الشجيرى ثم يُفرض هذا النظام على صخور المجموعة السفلية والتى قد يكون نظام الصرف بها متعامداً عند تكونه.

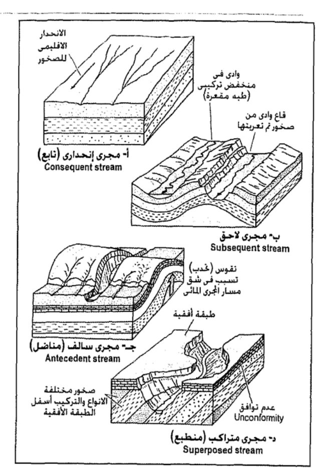
VIII. نهر النيل بمصر

يلعب نهر النيل دورا مهمًّا فى مصر، حيث يمد هذا النهر مصر بحوالى 98 ٪ من احتياجاتها بالماء. ويمثل نهر النيل ظاهرة جغرافية وجيولوجية مميزة. حيث يجرى من منابعه الاستوائية فى قلب أفريقيا، ثم يتجه شمالا إلى البحر المتوسط ملتزما بهذا الاتجاه. ولا يجرى نهر النيل فى إقليم طبيعى واحد مثل نهر الأمازون، بل يجرى فى عدة أقاليم متباينة، ويخترق حوالى 35° من درجات العرض ليصل بين منابعه ومصبه.

ويحمل نهر النيل حوالى 86 بليون متر مكعب من المياه سنويا، مما يجعله أحد أصغر الأنهار فى العالم، على الرغم من حوضه الكبير (3000000 كم^2) وطوله الذى يصل إلى 6825 كم. ويبين جدول (2.12) مقارنة بين نهر النيل وبعض الأنهار الرئيسية فى العالم.

أ. نشأة وتطور نهر النيل

نشأ نهر النيل قبل نحو 6 ملايين سنة مضت. وبالطبع فإن شكل نهر النيل الحالى هو شكل حديث نسبيا، وصل إليه النيل بعد سلسلة طويلة من التغيرات استغرقت عمر نهر النيل نفسه. ويعتبر نهر النيل نهرا



شكل (30.12): تقدم العلاقة بين المجارى المائية وجيولوجية المنطقة التى تجرى بها معلومات عن التاريخ التركيبى لتلك المنطقة.
أ. مجرى انحدارى consequent stream، حيث يتبع مسار المجرى المائى انحدار سطح الأرض
ب. مجرى لاحق subsequent stream، حيث يجرى المجرى المائى على امتداد أحزمة الصخور الضعيفة أو فى مجرى مائى تكون نتيجة لتركيب جيولوجى
جـ. مجرى سالف (مناضل) antecedent stream، حيث يحافظ المجرى المائى على مجراه عبر الصخور التى ارتفعت لتعترض طريقه بدلا من الجريان على جوانب تلك المرتفعات.
د. مجرى متراكب superposed stream، وهو مجرى مائى نحت مجراه عبر مجموعة من الصخور حتى وصل إلى مجموعة أخرى مختلفة فى خواصها الصخرية والتركيبية. وقد تحدد المجرى الأصلى للمجرى المائى عند نحته للمجموعة العليا وليس تبعا للمجموعة التى ينساب خلالها حاليا.
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

تكوّن المرتفع الحالى، وأنه حافظ على مجراه الأصلى والتزم به على الرغم من التغيرات فى الصخور أو فى

جدول (2.12): النيل مقارنة بأنهار العالم .

النهــر	الطول (كم)	مساحة الحوض (بالألف كم^2)	التصريف (بالبليون م^3/ سنة)	التصريف فى وحدة المساحة (م^3/ ثانية لكل ألف كيلو متر مربع)
النيل	6825	2960	84	0.86
الأمازون	6700	7050	5518	24.80
الكونجو	4700	3820	1248	10.40
هوانج هى	4630	673	123	2.23
ميكونج	4200	795	470	13.84
النيجر	4100	1220	192	5.74
المسيسيبى	3970	3270	562	5.66
الدانوب	2900	816	206	7.80
الزامبيزى	2700	1200	223	5.90
الراين	1320	224	70	9.80

(المصدر: سعيد، رشدى ، **1993**م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه فى الماضى والمستقبل، دار الهلال) .

مركبا تكون نتيجة اتصال عدد من الأحواض الداخلية المنفصلة التى تكونت فى العصر المطير الذى تلا تراجع ثلوج العصر الجليدى الأخير منذ ما يقرب من عشرة آلاف عام .

وقد حفر النيل مجراه بعد أن جف حوض البحر الأبيض المتوسط ، ثم تحول هذا الحوض إلى صحراء جرداء منذ 6 مليون سنة عندما أغلق مضيق جبل طارق، والذى يربط البحر المتوسط بالمحيط الأطلنطى. وقد كانت مصر معزولة عن أفريقيا خلال تلك الفترة بهضبة النوبة المرتفعة ، كما لم يكن لأنهارها أى اتصال بالجنوب (جدول 3.12) .

وقد تراوح عمق البحر المتوسط الجاف بين ثلاثة وأربعة كيلومترات ، مما دفع الأنهار القليلة التى كانت تصب فيه إلى أن تعمق مجراها إلى هذا العمق . وقد وصل عمق مجرى النيل إلى 4 كم فى الشمال وشكل هذا النهر ، والذى يسمى بنهر فجر النيل (الإيونيل Eonile)، خانقا عظيما . وقد تغطى هذا الخانق بماء البحر الأبيض المتوسط عندما عاد وامتلأ البحر بالماء منذ حوالى 5.4 مليون سنة . وقد أصبح الخانق خليجا بحريا لأكثر من مليونى سنة استقبل بعدها نهرا هائلا أطلق عليه النيل القديم الباليونيل (Paleonile) ، حيث امتلأ الخانق بالرواسب . ويبدو أن كلا النهرين السابقين كان ينبعان محليا من هضاب مصر والنوبة ، ولم يكن لهما أى اتصال بأفريقيا . وقد انتهت تلك الفترة من تاريخ النيل منذ حوالى 2 مليون سنة مضت .

وقد مرت فترة طويلة قبل أن يتصل النهر المصرى بأفريقيا الاستوائية منذ حوالى 800000 سنة ، حيث وصل النهر من أفريقيا والذى يسمى نهر ماقبل النيل (البرينايل Prenile) ، والذى كان ينبع من منطقة منابع النيل الحديثة التى تغيرت تضاريسها لتقارب شكلها الحديث ، فتحول تصريف أنهارها إلى حوض النيل . وتمثل تلك الفترة أول اتصال بمصادر المياه فى المرتفعات الأثيوبية ، كما تميزت تلك الفترة بتحول مياه

النيل إلى منخفض الفيوم لتكون بحيرة . وقد حملت مياه نهر ماقبل النيل كميات هائلة من الرمل والحصى رسبها فى سهله الفيضى والدلتا الذين كانا أكبر مساحة من سهل النيل الحديث ودلتاه . وتظهر تلك الرواسب التى حملها نهر ما قبل النيل فى كل مكان على جانبى نيل مصر ودلتاه ، وتشكل واجهاتها محاجر الرمال التى تزود مصر كلها برمال البناء .

وبعد أن توقف نهر ما قبل النيل منذ حوالى 400000 سنة ، وصل إلى مصر نهر أقل قدرة أطلق عليه نهر النيل الحديث (النيونيل Neonile)، وكان اتصال هذا النهر بأفريقيا ضعيفا وتكرر انقطاعه . وفى كل مرة عاد فيها هذا الاتصال كان النهر أقل تصريفا وأقصر عمرا عن نهر ما قبل النيل . ولنهر النيونيل الذى يمتد حتى وقتنا الحالى أهمية خاصة ، لأنه شهد كل تاريخ الإنسان على أرض مصر والذى ظهر مع بدء هذا النهر .

ومنذ حوالى 10000 سنة من الآن زادت الأمطار على الهضبة الأثيوبية بل ومنطقة الساحل الأفريقى الشرقى كلها ، كما امتدت جبهة المطر شمالا حتى غطت شمال السودان وجنوب مصر ، وظلت تلك المناطق مطيرة لمدة 4500 سنة . وبوصول المياه بغزارة من المرتفعات الأثيوبية وهضبة البحيرات ولد النيل الحديث الذى أصبح مستديما بعد أن كان فصليا. وقد زادت أمطار شمال السودان وجنوب مصر من مياه النهر فى فترته الأولى ، حيث ارتفع منسوب النهر وبدأ فى ترسيب الرواسب التى كان يحملها فى واديه ودلتاه

جدول (3.12): ملخص لأهم الأحداث التى مرت على نيل مصر منذ نشأته . العمر بملايين السنين قبل الآن.

العمر (بملايين السنين قبل الآن)	النهـــر	الأحـــداث
6 - 5.4	فجر النيل (الأيونيل) Eonile	تكون خانق النيل نتيجة جفاف البحر المتوسط وتكون دلتا على شكل مروحة فى الجزء الشمالى من الدلتا .
5.4 – 3.3	طور الخليج البحرى	مياه البحر المتوسط تغرق خانق فجر النيل عندما ترتفع المياه بعد عودتها لهذا البحر
3.3 -1.8	النيل القديم (الباليونيل) Paleonile	نهر محلى يحتل الخليج ويملؤه برواسبه ، وتكون دلتا قدم الطائر .
1.8 – 0.8	طور الصحراء	تحول مصر إلى صحراء – توقف النيل عن الجريان .
0.8 – 0.4	ما قبل النيل (البرينايل) Prenile	أول نيل فى مصر يقيم اتصالا بأفريقيا الاستوائية – نهر هادر كبير التصرف وتكون دلتا قوسية.
0.4–حتى الآن	النيل الحديث (النيونيل) Neonile	فترة يسودها نهر أقل قدرة له اتصال بأفريقيا-يعلو وينخفض لمرات عديدة . أول الأنهار ذات اتصال بأفريقيا يأتى خلال فترة مطيرة (400 ألف – 200 ألف سنة) يتلوه نهر متقلب (200 ألف -70 ألف سنة) ثم نهران فصليان وأخيرا النهر الحديث ذو الجريان المستديم (12 ألف سنة – الآن) . تعرضت الدلتا القديمة للتعرية ثم أخذت تزداد تدريجيا خلال الثمانية آلاف سنة الأخيرة.

(المصدر: سعيد، رشدى ، 1993م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه فى الماضى والمستقبل، دار الهلال) .

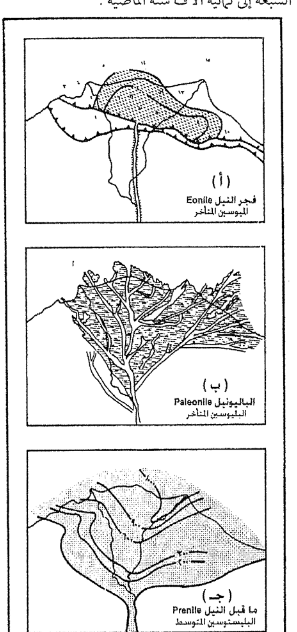
فى الفترة بين ثمانية آلاف وسبعة آلاف سنة مضت ، فتكونت بذلك أرض مصر الخصبة ، والتى وصفها هيرودوت بأن مصر هبة النيل . ويوضح جدول (3.12) الأحداث التى مرت على نيل مصر منذ نشأته.

ب. تطور دلتا النيل

إن الدلتا التى نعرفها اليوم ليست إلا واحدة من دلتاوات عديدة تعاقبت على هذا الموقع. فقد كان لكل الأنهار التى سبقت النيل الحديث دلتاوات اختلفت كل واحدة منها عن الأخرى ، حيث أن الأنهار التى احتلت مجرى النيل منذ نشأته قد اختلفت عن بعضها البعض من حيث مصادر مياهها أو كمية المياه التى حملتها أو نوع الرواسب التى حملتها تلك المياه . ولذلك فقد تعاقبت على موقع الدلتا الحديثة دلتاوات مختلفة ، شكل (31 .12) ، أمكن التعرف عليها ودراستها من دراسة جسات الآبار العميقة التى حفرت بدلتا النيل للبحث عن البترول .

فقد كانت دلتا فجر النيل Eonile Delta أول الدلتاوات التى ترسبت على شكل مروحة فى الجزء الشمالى من الدلتا ، ثم جاء نهر النيل القديم (الباليونيل) بعد أكثر من مليون سنة حيث أخذت الدلتا موضعها الحالى ، وبدأ النهر يتفرع عند حد الدلتا الجنوبى تقريبا . وقد تشكلت دلتا تشبه إلى حد كبير دلتا نهر المسيسيبى الحديثة ، والتى تعرف بدلتا قدم الطائر bird-foot delta.

وقد تكونت دلتا ماقبل النيل (البرينايل) عندما حمل النهر رواسب خشنة من الرمال، حيث كانت مياه النهر أكثف من ماء البحر التى كانت تصب فيه ، وترسبت تلك الرواسب على طول جبهة الدلتا على شكل قوس منتظم دون بروز فى البحر . ثم جاءت مرحلة النيل الحديث (النيونيل) والذى تعرضت الدلتا خلاله لفترات طويلة من التحات ، فأزيلت كميات كبيرة من الدلتا القديمة وبقى جزء آخر شكل نواة للدلتا التى غطاها النهر الحديث وأخذت تتزايد تدريجيا خلال السبعة إلى ثمانية آلاف سنة الماضية .



شكل (31.12): دلتاوات النيل المتعاقبة

أ. دلتا فجر النيل (الإيونيل) Eonile - الميوسين المتأخر

ب. دلتا قدم الطائر (الباليونيل) Paleonile - البليوسين المتأخر

جـ. دلتا ما قبل النيل القوسية (البرينيل) Prenile - البليستوسين المتوسط .

(المصدر: سعيد ، رشدى ، 1993م . نهر النيل: نشأته واستخدام مياهه فى الماضى والمستقبل. دار الهلال ، القاهرة) .

الملخص

1. المجارى المائية جزء من دورة الماء ، وتعتبر من الوسائل الرئيسية التى يعود بها الماء من الأرض إلى البحر. وتساعد المجارى المائية فى تشكيل سطح الأرض ونقل الرواسب إلى المحيطات.

2. يتأثر انسياب الماء فى المجارى المائية بعدد من المتغيرات أهمها التصريف والسرعة وشكل وحجم قناة المجرى المائى والانحدار ، وهو مقياس لدرجة انحدار قناة المجرى المائى لأسفل ، ومستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) والحمولة ، وهى المواد التى يحملها أو يحركها الماء المنساب .

3. ترتبط عوامل التصريف والسرعة ومساحة القطاع العرضى لقناة المجرى المائى مع بعضها بحيث إذا تغير التصريف تغير العاملان الآخران.

4. نتيجة زيادة التصريف فى اتجاه المصب فإن عرض وعمق قناة المجرى المائى يزداد ، وتزداد السرعة بنسبة طفيفة .

5. تستطيع المجارى المائية التى تكوّن فيضانات كبيرة أن تنقل أحمالا كبيرة وأن تحرك الجلاميد الكبيرة .

6. مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية) لمعظم المجارى المائية هو سطح البحر فى جميع أنحاء العالم. وقد يتسبب هذا المستوى فى وقف التعرية مؤقتا ناحية منبع المجرى المائى .

7. من النادر وجود قنوات مجارى مائية مستقيمة. وتتكون المجارى المائية المنعطفة عندما يكون الانحدار لطيفا وتتكون الحمولة من رواسب دقيقة الحبيبات . وتتكون القنوات المجدولة فى مجارٍ مائية تتميز بتصريف متغير بنسبة عالية وحمل كبير.

8. تتكون حمولة المجارى المائية من مجموع حمولة القاع والحمولة المعلقة والحمولة الذائبة . وقد تصل نسبة حمولة القاع إلى حوالى 50 ٪ من الحمولة الكلية . وتأتى معظم الحمولة المعلقة من تعرية حطام صخرى دقيق الحبيبات أو من جوانب المجارى المائية . وتكون الحمولة الذائبة أكبر فى المجارى المائية التى تستقبل كميات كبيرة من المياه الجوفية من المجارى المائية التى تستقبل مياهها أساسا من الجريان السطحى.

9. يقل حجم حبيبات الرواسب فى اتجاه مصب المجرى المائى نتيجة فرز وبرى الحبيبات. كما يتغير التركيب المعدنى لحمولة المجرى المائى فى اتجاه المصب حيث تضاف رواسب مختلفة التركيب .

10. عندما تفيض المجارى المائية أثناء الفيضانات وتغمر ضفتى المجرى المائى تتكون جسورا طبيعية تتدرج جانبيا إلى غرين وصلصال مترسبين على السهل الفيضى. وتتكون الشرفات (المصاطب) من سهول فيضية مهجورة حيث يقوم المجرى المائى بالتعرية فى مستوى أكثر انخفاضا من مستوى السهل الفيضى .

11. تنشأ المراوح الطمية (الفيضية) نتيجة الانخفاض المفاجئ فى انحدار المجرى المائى . وترتبط مساحة المروحة المتكونة بحجم المنطقة التى تمد المروحة الطمية (الفيضية) بالرواسب أعلى المجرى المائى.

12. تتكون الدلتا عندما يدخل مجرى مائى مسطحا من الماء الساكن ويفقد قدرته على نقل الرواسب . ويعكس شكل الدلتا التوازن بين الترسيب والتعرية على امتداد الشاطئ .

13. ترتبط أنماط صرف المجارى المائية بنوع الصخور المتواجدة أسفلها وتركيبها ، كما يمكن أن تمدنا هذه الأنماط بالمعلومات عن تاريخ المجرى المائى .

14. نشأ نهر النيل قبل حوالى 6 ملايين سنة ، ومر بعديد من المراحل ، حيث تميزت كل مرحلة بنظام نهرى رئيسى ومصدر للمياه . وقد تم تعرف أربع مراحل تعرف بفجر النيل والنيل القديم وماقبل النيل والنيونيل . وعندما وصلت المياه بغزارة من المرتفعات الأثيوبية وهضبة البحيرات قبل 400000 – 200000 سنة ولد النيل الحديث .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://barsoom.msss.com/
http://www.epa.gov/ow/
http/ps/channels/channels.html

المصطلحات المهمة

alluvial fan	مروحة طمية (فيضية)	meander	منعطف
alluvium	طمي	mouth	مصب
antecedent stream	مجرى مناضل (سالف)	natural levee	جسر طبيعي
base level	مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)	oxbow lake	بحيرة قوسية (بحيرة قرن الثور)
bed load	حمولة القاع	placer	ركيزة (مرقد أو رواسب حصوية مكانية)
bird-foot delta	دلتا قدم الطائر	point bar	حاجز حرفي (جانبي)
bottomset bed	طبقة القاع	pothole	حفرة وعائية
braided stream	مجرى مجدول (مضفر)	radial drainage	تصريف شعاعي
capacity	قدرة	rapids	جنادل
competence	كفاءة	rectangular drainage	تصريف متعامد
consequent stream	مجرى انحداري	recurrence interval	فترة تكرار
cutoff	قطع نهري	reservoir	خزان
delta	دلتا	river	نهر
dendritic drainage	صرف شجيري	runoff	جريان سطحي
discharge	تصريف	saltation	وثب
dissolved load	حمولة ذائبة	stream	مجرى مائي
distributary	فرع توزيع	stream piracy	قرصنة نهرية
drainage basin	حوض صرف	subsequent stream	مجرى تالٍ (لاحق)
drainage network	شبكة صرف	superposed stream	مجرى مائي متراكب
flood	فيضان	suspended load	حمولة معلقة
floodplain	سهل فيضي	terrace	شرفة (ج.شرفات) أو مصطبة نهرية
foreset bed	طبقة الواجهة	transpiration	عملية النتح
gradient (stream)	انحدار (المجرى المائى)	tributary	رافد
groundwater	مياه جوفية	topset bed	طبقة القمة
hydrologic cycle	دورة الماء	trellis drainage	صرف تشابكى (عريشى)
hydrology	علم المياه (الهيدرولوجيا)	turbulent flow	انسياب مضطرب
infiltration	تسرب	underground water (groundwater)	ماء جوفى
laminar flow	انسياب رقائقى (صفائحى)	valley	وادي
load	حمولة	water divide	مقسم المياه
longitudinal profile	قطاع طولى (جانبية طولية)	waterfalls	مساقط المياه (شلالات)

الأسـئلة

1- ماالـدليل الـذى يقودنـا للتفكـير فى أن المجـارى المائية يجب أن تكون قوة كبيرة تؤثر فى تغيير شكل سطح الأرض ؟

2- وضح كيـف تتعـدل أبعـاد المجـرى المـائى عمقـا وعرضا وسرعة الاستجابة للتغير فى التصريف.

3- اذكر العوامل التى تؤدى إلى تغـير نظـام المجـارى المائية المجدولة إلى نظام المجارى المائية المنعطفة .

4- ما العوامل التى يجب أن تتغـير فى المجـرى المائيـة لكى يحمل الحصى الدقيق كحمولة معلقة بعـد أن كان يتحرك كحمولة قاع ؟

5- لماذا يقل حجم حبيبات الرواسب المنقولة فى اتجاه المجرى المائى إذا زادت الـسرعة فى اتجـاه المجـرى المائى ناحية المصب ؟

6- كيف يمكن اسـتخدام التتـابع الطبـاقى الـداخلى والصفات الرسـوبية للتمييـز بـين دلتـا ومروحـة طميية محفوظة فى سجل طبقى ؟

7- كيف يمكن أن تحدد السرعة ما إذا كان الانـسياب صفائحيا أو مضطربا ؟

8- كيف تختلف قناتا الأنهار المنعطفة عن المجدولة ؟

9- ما الجسر الطبيعى؟ وكيف يتكون ؟

10- ما هو تصريف المجرى المائى ؟ وكيف يتغير مـع السرعة ؟

11- اذكر تعريف القطاع الطولى للمجرى المائى .

12- إذا كانت مدينتك مقامة على سهل فيضى غمر فى العام الماضى بفيضان- 50 سـنة، مـا إمكانـة أن يتكرر فيضان الارتفاع بنفسه فى العـام التـالى ؟ اذكر ماذا يعنى مصطلح فيضان ـ 50 سنة.

13- إذا كنت تعيش فى مدينـة عـلى ضـفاف منعطـف لنهـر كبـير ، واقـترح مهنـدس المدينـة أن تبنـى جسور صناعية جديدة وعالية لمنع المنعطـف مـن القطع النهرى . اذكر الأدلة التى تتفـق مـع هـذا الاقتراح أو تعارضه .

14- قام المهندسون بحفر مجرى مائى منعطـف ، فـإذا تـرك هـذا المجـرى لكـى يعـدل مجـراه طبيعيـا ، ما التغيرات التى يمكن أن تتوقعها ؟

15- إذا افترض أن هناك ارتفاعًا ملحوظًا فى مـستوى سطح البحر نتيجة انصهار الجليد القطبى ، اذكـر كيف يتأثر القطاع الطولى للأنهار فى العالم .

16- لم تتكون دلتـا عنـد دخـول نهـر كبـير بـه حمولـة رسـوبية كبـيرة إلى البحـر أو المحـيط ؟ اذكـر العوامل والظروف التى قد تكـون مـسئولة عـن عدم تكون الدلتا .

17- قام مجرى مائى بتعرية قناته فى اتجاه مصبه بصورة كبيرة ، خلال السنوات الأولى التاليـة لبنـاء سـد عليه . هل كان من الممكن توقع هذه التعرية؟

الفصل

13 المياه الجوفية

I. المياه الموجودة تحت سطح الأرض

أ. منسوب الماء الجوفى

II. كيف يتحرك الماء فى التربة والصخور؟

أ. حركة الماء في نطاق التهوية

ب. حركة الماء فى نطاق التشبع

جـ. سرعة انسياب المياه الجوفية

III. تصنيف الطبقات الجيولوجية حسب قدرتها على حمل المياه الجوفية

أ. مكامن المياه الجوفية

ب. بعض خصائص مكامن المياه الجوفية

جـ. الانسياب الارتوازى

IV. العلاقة بين مكامن المياه الجوفية والمياه السطحية

أ. التوازن بين إعادة الملء والتصريف

ب. التصريف الطبيعي (الينابيع) والصناعى (الآبار)

1. الينابيع

2. الآبـار

V. نوعيه (درجة جودة) الماء وتلوث المياه الجوفية

أ. كيميائية المياه الجوفية

ب. التلوث بمخلفات المجارى

جـ. النفايات السامة والسموم الزراعية

د. تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض

VI. العمل الجيولوجي للمياه الجوفية

أ. الذوبان

ب. التلاحم والإحلال الكيميائي

جـ. الكهوف والمغارات الكربوناتية

د. رواسب الكهوف

هـ. الحفر البالوعية

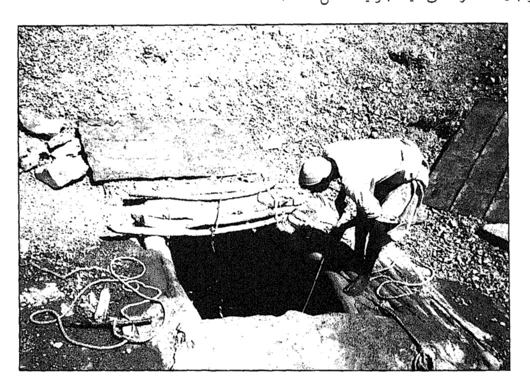
و. طوبوغرافية الكارست

VII. الماء الموجود في أعماق القشرة الأرضية

أ. المياه الحرمائية

يعتبر الماء ضرورة حيوية للإنسان ، أيا كان مصدر الحصول عليه سواءً من الأنهار أو المجارى المائية عموما أو من البحيرات أو من ماء المطر مباشرة أو من المياه الجوفية . وقد أنشئت معظم المدن والتجمعات السكانية بالقرب من المجارى المائية التى تمدها بمصدر الماء . ونتيجة لتزايد عدد السكان بهذه المدن والتجمعات السكانية عموما فإن هذه المجارى المائية أصبحت غير كافية ، ولذلك لجأ الإنسان للحصول على الماء من مصادر تقع على مسافات بعيدة عبر قنوات ، أو بحفر آبار للحصول على المياه الجوفية (شكل 1.13) .

النفايات البشرية والصناعية ، والتى يصل جزء كبير منها إلى المياه التى يعتمد عليها الناس فى حياتهم، مما أدى إلى ظهور عديد من المشكلات الكبيرة فى هذه التجمعات السكانية ، مثل مدى كفاية هذه المياه للاحتياجات المستقبلية؟ وهل نوعية هذه المياه مناسبة للأغراض المختلفة التى تستخدم فيها ، ومدى نقاء هذه المياه؟ ، حيث أن الماء الصالح للاستخدام يجب أن يكون ذا صفات جيدة ، وأن يكون عديم اللون والطعم والرائحة .



شكل (1.13): بئر أبو الحماميد فى وادى أبو الحماميد – الصحراء الشرقية – مصر . (د. حسين أحمد على ، هيئة المساحة الجيولوجية – مصر).

ونتيجة للتزايد السكانى فقد تزايد الطلب على المياه، مما أدى إلى تناقص الماء فى عديد من الأماكن ، كما أدى النمو الصناعى المطرد إلى تكون كميات كبيرة من

ا. المياه الموجودة تحت سطح الأرض

المياه الجوفية مصدر مهم للماء ، وخاصة فى المناطق القاحلة . وقد حفر الإنسان فى أزمنة ما قبل الميلاد قنوات وأنفاق يصل طولها إلى عدة كيلو مترات لجمع

ونقل المياه الجوفية فى عديد من بلدان شمال أفريقيا وشرق آسيا . ولم يكن معروفا حتى قرب نهاية القرن السابع عشر أن مياه الأنهار تنشأ أصلا من مياه الأمطار، رغم أن القرآن الكريم أشار إلى هذا فى عديد من السور القرآنية قبل أربعة عشر قرنا . كما ثبت أن جزءا يسيرا فقط من الماء المتساقط على أحواض التجميع والروافد ينساب على هيئة أنهار . ولم يكن من الصعب تخيل مصير باقى الماء المتساقط ، حيث يتبخر بعض هذا الماء ، بينما تستخدم النباتات الجزء الباقى ، حيث يرشح ويتسرب إلى باطن الأرض . وهذا الجزء الأخير هو المصدر الأساسى للمياه الجوفية .

ومن المعروف أن أقل من 1٪ من الماء على الأرض هو مياه جوفية . وتعرّف **المياه الجوفية groundwater** بأنها كل الماء الموجود فى فراغات صخور الأساس bedrock والحطام الصخرى (الأديم) regolith . وعلى الرغم من أن حجم الماء الجوفى يبدو صغيرا ، إلا أنه يزيد 40 مرة عن حجم كل الماء العذب الموجود فى البحيرات أو المنساب فى المجارى المائية ، كما يساوى حوالى ثلث الماء الموجود فى كل الثالج والجليد القطبى فى العالم .

وتنشأ معظم المياه الجوفية - كما ذكرنا سابقا - من الأمطار التى تتسرب إلى الأرض لتصبح جزءا من نظام المياه الجوفية . ويتحرك الماء السطحى ببطء ناحية المحيط ، إما مباشرة خلال الأرض أو نتيجة الانسياب فوق سطح الأرض لينضم إلى المجارى المائية (شكل 1.12) ، التى تنساب بدورها إلى المحيط . وتنشأ المياه السطحية أساسا كماء جوى **meteoric water** ، وهو الماء المتساقط من الغلاف الجوى الحالى . وقد اشتقت كلمة جوى meteoric من الكلمة الإغريقية meteoron بمعنى ظاهرة فى السماء ، ويستمد منها أيضا كلمة meteorology أى علم الأرصاد الجوية .

وقد قام العالم الفرنسى بيير بيروPierre Perrault بمحاولة تقدير كمية المياه الجوفية المستمدة من الأمطار، بقياس كمية الأمطار السنوية المتساقطة على جزء من حوض نهر السين فى شرق فرنسا ، و أيضا قياس متوسط التصريف السنوى للمجرى المائى فى الجزء نفسه من حوض التصريف . وتوصل بيرو بعد حساب الفقد نتيجة البخر ، أن الفرق بين كميات المطر المتساقط والماء المنصرف خلال عدة سنوات يكفى ليكوّن كمية الماء الموجودة فى باطن الأرض فى المنطقة .

ويتواجد الماء فى كل مكان تحت سطح الأرض . إلا أن أكثر من نصف الحجم الكلى للمياه الجوفية بما فيه الذى يستخدمه الإنسان يتواجد على عمق يصل إلى حوالى 750 مترا تقريبا من سطح الأرض . ويقدر أن حجم الماء فى هذا النطاق يكافئ طبقة من الماء يبلغ سمكها 55 مترا وتغطى سطح الكرة الأرضية بالكامل. وتقل كمية المياه الجوفية تدريجيا تحت عمق 750 مترا ، ويكون التغير غير منتظم . وقد عُثر على الماء على عمق 9.4 كم أثناء حفر آبار البترول . كما عَثر العلماء الروس على الماء على عمق يزيد عن 11 كم أثناء حفر بئر عميقة فى جزيرة كولا . وعلى الرغم من أن الماء قد يتواجد فى صخور القشرة الأرضية عند هذه الأعماق ، إلا أن الضغوط التى تسببها الصخور التى تعلوه تكون عالية وتكون المسام الموجودة صغيرة جدا لدرجة أنه من المستبعد تواجد كمية كبيرة من الماء فيها، أو أن الماء يتحرك بسهولة عند تلك الأعماق . أما بالنسبة لدراستنا الحالية ، فإن المياه الجوفية هى تلك المياه التى توجد فى المسافة الواقعة بين سطح الأرض حتى عمق حوالى 750 مترا.

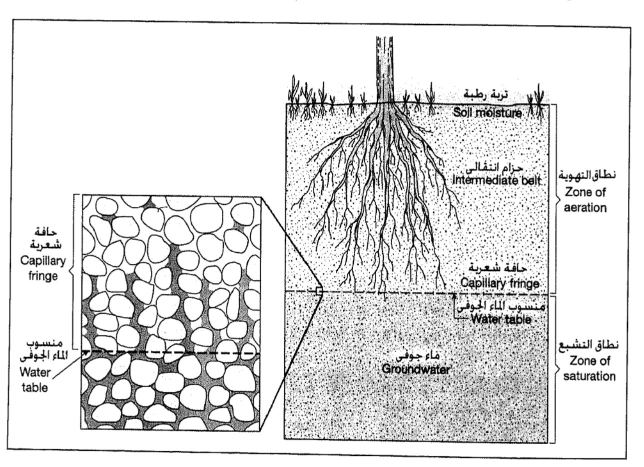
أ. منسوب الماء الجوفى

يتحرك الماء المتسرب إلى القشرة الأرضية تحت تأثير الجاذبية الأرضية فى نطاقين من التربة والصخور يطلق

على العلوى منهما نطاق التهوية zone of aeration وعلى السفلى منهما نطاق التشبع zone of saturation ، ويفصل بينهما مايعرف بمنسوب الماء الجوفى أو الأرضى water table . ويتميز نطاق التهوية بأن فراغات المسامية فيه تكون مشبعة جزئيا بالماء ، الذى يكوّن طبقة رقيقة جدا تلتصق بالحبيبات نتيجة للتوتر السطحى ، كما يمتلئ جزئيا بالهواء أيضا . ويسمى هذا النطاق أيضا بنطاق الارتشاح vadose zone . أما نطاق التشبع فيتميز بأن كل فتحات الصخر تكون ممتلئة بالماء (شكل 2.13) . أما منسوب الماء الأرضى فيطلق على الحد الفاصل بين نطاقى التهوية والتشبع .

وفى الرسوبيات دقيقة الحبيبات ، يوجد فوق منسوب المياه الجوفية مباشرة نطاق ضيق لا يزيد سمكه على 60 سم ، ويكون هذا النطاق رطبا نتيجة التجاذب الشعرى capillary attraction الذى يجذب الماء من قمة منسوب المياه الجوفية إلى مسافة قصيرة داخل نطاق التهوية . ويسمى هذا النطاق الحافة الشَّعْرية capillary fringe (شكل 2.13) . والتجاذب الشعرى هو قوة التماسك بين سائل وصلب ، والتى تسبب سحب الماء لأعلى فى أنابيب صغيرة . وهى القوة نفسها التى تسحب الحبر لورق النشاف أو الكيروسين لفتيلة الكيروسين .

وعلى الرغم من أن منسوب المياه الجوفية يوجد تحت سطح الأرض ولا يمكن رؤيته ، إلا أنه دُرس وعُملت له خرائط ، من خلال الدراسات التى أجريت

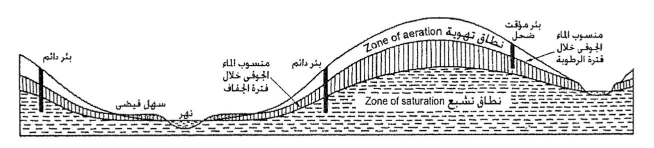


شكل (2.13): توزيع الماء الجوفى (الأرضى) underground water ، حيث يفصل منسوب الماء الجوفى نطاق التهوية عن نطاق التشبع .
(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

على الآبار والينابيع وانسياب الماء على سطح الأرض . كما دُرس تحرك المياه الجوفية باستخدام الصبغات ، حيث جُمع كم هائل من المعلومات عن هذا الجسم غير المرئى من المياه الجوفية .

وعندما يحفر بئر تحت منسوب المياه الجوفية ، فإن الماء ينساب من نطاق التشبع فى الحفرة ويملؤها حتى مستوى هذا المنسوب . وقد يتواجد منسوب المياه الجوفية (الحد العلوى لنطاق التشبع) على عمق متر أو أكثر فى المناطق الرطبة ، أو على عمق مئات الأمتار أسفل سطح الأرض فى المناطق الصحراوية . ويوجد منسوب المياه الجوفية فى البحيرات والمستنقعات عند سطح الأرض . ومن الطبيعى أن ينحدر منسوب الماء الجوفى ناحية أقرب مجرى مائى أو بحيرة ، بينما يكون فى الأرض ، ويرجع السبب فى ذلك إلى أن الماء يميل للتحرك نحو المناطق المنخفضة تضاريسيا حيث يكون الضغط عليه أقل ما يكون . وفى أوقات الجفاف ، حيث يتوقف سقوط الأمطار لعدة أسابيع أو حتى أشهر فإننا نشعر أن منسوب المياه الجوفية قد انخفض فى الآبار الجافة ، ويؤدى تكرار تساقط المطر إلى تزويد الأرض بالماء حتى يظل مستوى المياه الجوفية عند المستوى العادى.

وأيا كان العمق ، فإن منسوب الماء الجوفى يعتبر سطحا مهما ، لأنه يمثل الحد العلوى لكل الماء الجوفى . ولهذا السبب فإن تحديد عمق وشكل هذا المنسوب يمثل هدفا رئيسيا للجيولوجيين والقائمين على حفر آبار المياه .



شكل (3.13): شكل توضيحى لبيان العلاقة بين منسوب الماء الجوفى وسطح الأرض واختلاف منسوبه خلال نطاق التشبع المتغير بعد فترات طويلة من سقوط المطر أو الجفاف (الجدب) . يلاحظ أن الماء يتحرك إلى الجهات المنخفضة تضاريسيا ، حيث يكون الضغط أقل ما يكون ، كما ينخفض مستوى الماء الجوفى فى الفصول الجافة ويرتفع فى الفترات الرطبة .

(After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

المناطق الصحراوية بعيدا عن سطح الأرض . وحيث إن المياه الجوفية تتواجد فى كل مكان على عمق ما تحت سطح الأرض ، فإنه سيكون هناك منسوب للمياه الجوفية باستمرار.

وفى المناطق الرطبة ، يكون منسوب المياه الجوفية مطابقا تقريبا لشكل سطح الأرض الذى يعلوه (شكل 3.13) ، حيث يكون مسطحا فى المناطق الأفقية ، بينما يرتفع وينخفض فى مناطق التلال مع تغير شكل سطح

II. كيف يتحرك الماء فى التربة والصخور؟

تتحرك المياه الجوفية باستمرار كجزء من دورة الماء فى الطبيعة . ويتسرب ماء المطر ، والذى نتج أساسا من بخر الماء فى المحيطات ، ليدخل إلى خزان المياه الجوفية . ويصل بعض هذا الماء المتحرك ببطء إلى قنوات المجارى المائية ليساهم مع الماء المتحرك إلى المحيط حيث تبدأ الدورة مرة أخرى .

وتتحرك معظم المياه الجوفية ببطء فى المئات الأمتار القليلة القريبة من سطح الأرض، لدرجة أن سرعتها تقاس بالسنتيمترات فى اليوم أو بالأمتار فى العام ، على عكس الانسياب السريع للأنهار والذى يقاس بالكيلومترات فى الساعة . والسبب فى هذا التناقض بسيط ، حيث ينساب الماء فى المجرى المائى دون عوائق فى قنوات مفتوحة ، أما المياه الجوفية فإنها تتحرك غالبا عبر مسارات طويلة دقيقة ومتعرجة . لذلك ، فإن انسياب المياه الجوفية يعتمد بدرجة كبيرة على طبيعة الصخر أو الراسب الذى ينساب خلاله .

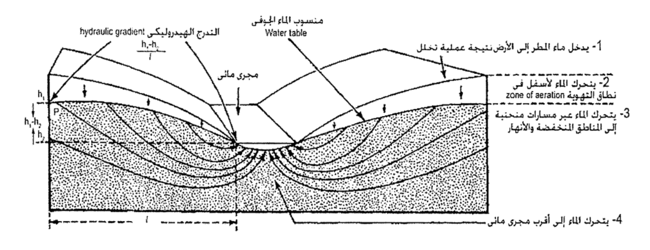
أ. حركة الماء فى نطاق التهوية

يتسرب ماء المطر المتساقط فى التربة التى تحتوى عادة على صلصال ناتج من عملية التجوية الكيميائية إلى صخر الأساس . ونتيجة وجود حبيبات الصلصال الدقيقة ، فإن التربة تكون عموما أقل نفاذية من الحطام الصخرى (الأديم) regolith الموجود أسفلها والذى يحتوى على حبيبات أكبر حجما . وتعمل النفاذية المنخفضة وحبيبات الصلصال الدقيقة على أن تحتفظ التربة بجزء من الماء بسبب تأثير قوى الجاذبية الجزيئية . وتسمى هذه الطبقة بطبقة التربة الرطبة layer of soil moisture (شكل 2.13). ويتبخر جزء من هذه الرطوبة مباشرة إلى الهواء ، كما تمتص جذور النباتات الكثير منها ، ثم تعود بعد ذلك إلى الغلاف الجوى أثناء عملية النتح . ويتسرب الماء الذى لم يتأثر بقوى الجاذبية الجزيئية إلى أسفل فى التربة حتى يصل إلى منسوب المياه الجوفية تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية . ومع توالى سقوط الأمطار يتسرب المزيد من الماء فى الأرض ، بينما يكون نطاق التهوية عموما أقرب إلى الجفاف بين فترات سقوط المطر باستثناء الحافة الشعرية وطبقة التربة الرطبة .

ب. حركة الماء فى نطاق التشبع

يُطلق على حركة الماء الجوفى فى نطاق التشبع مصطلح تخلل **percolation** ، وهى عملية تشبه انسياب الماء من الإسفنج عند عصره بلطف . ويتخلل الماء ببطء فى مسام صغيرة جدا ويتحرك عبر مجارٍ مائية دقيقة . وتكون تلك الحركة أسهل عبر الأجزاء المركزية من الفراغات ، ولكن تقل إلى الصفر عند جوانب كل فراغ بسبب قوى الالتصاق الجزيئى molecular attraction.

ويتحرك الماء تحت تأثير الجاذبية الأرضية من المناطق التى يكون فيها منسوب المياه الجوفية عاليا إلى المناطق التى يكون منسوب الماء فيها منخفضا . ومعنى ذلك أن الماء يتحرك عموما فى اتجاه المجارى المائية أو البحيرات على سطح الأرض (شكل (3.13 و4.13)ويتحرك بعض الماء فقط أسفل منسوب المياه الجوفية مباشرة متبعا أقصر الطرق، بينما ينساب معظم الماء فى مسارات طويلة ومنحنية تمتد بعيدا فى باطن الأرض . كما قد تتجه بعض المسارات العميقة إلى أعلى ضد الجاذبية الأرضية ، حيث تدخل المياه الجوفية إلى بحيرة أو مجرى مائى ، ويحدث هذا الانسياب لأعلى عندما يكون الماء واقعا تحت تل أو مرتفع ويكون على أى مستوى فى نطاق التشبع ، لأنه يكون حينئذ واقعا تحت ضغط أعلى من الضغط الموجود أسفل المجرى المائى . ولذلك يميل الماء لأن ينساب ناحية النقاط التى يكون الضغط فيها أقل ما يمكن . ومع ذلك ، تتحرك معظم المياه الجوفية التى تدخل إلى المجرى المائى على امتداد مسارات ضحلة ليست بعيدة عن منسوب المياه الجوفية .



شكل (**4.13**): حركة الماء الجوفي في مادة منفذة ، حيث تمثل الأسهم الطويلة المنحنية قليلاً من كثير من مسارات شبه متوازية محتملة للماء الجوفي خلال المادة المنفذة . ويتحدد التدرج الهيدروليكي hydraulic gradient عند أى نقطة مثل p من الفرق في الارتفاع بين النقطتين ((h_1 و h_2) مقسوما على المسافة l بين النقطتين.
(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ج. سرعة انسياب المياه الجوفية

يوضح شكل (4.13) انحدار سطح المياه الجوفية عن طريق قياس الفرق في الارتفاع بين نقطتين (h_1 و h_2) تقعان على هذا السطح وقسمة الناتج على المسافة الأفقية (ℓ) بين النقطتين. ويطلق على قيمة الانحدار الناتج عموما التدرج الهيدروليكي **hydraulic gradient** . وهكذا تتناسب سرعة الماء الأرضي (V) مع التدرج الهيدروليكي :

$$V \alpha \frac{h_1 - h_2}{\ell} \quad (1)$$

وفي منتصف القرن التاسع عشر توصل المهندس الفرنسي هنري دارسي Henri Darcy إلى أن سرعة الماء الأرضي لا ترجع إلى انحدار منسوب الماء الجوفي (الانحدار الهيدروليكي) فقط ولكن إلى نفاذية الصخر الذي ينساب الماء خلاله أيضا . وقد اقترح دارسي معادلة يربط بها بين النفاذية وعجلة الجاذبية الأرضية ولزوجة الماء المشار إليه بمعامل (K). ويسمى هذا المعامل بمعامل النفاذية coefficient of permeability ، وهو يقيس ببساطة السيولة التي يتحرك بها الماء خلال الصخر . ويمكن توضيح المعادلة التي اقترحها دارسي كالتالي

$$V = \frac{K(h_1 - h_2)}{\ell} \quad (2)$$

وكما أوضحنا في الفصل الثاني عشر ، فإن تصريف المجاري المائية (Q) يتغير كدالة في كل من سرعة المجرى المائي (V) ومساحة المقطع العرضي (A). ويعتمد أيضا تصريف الماء الجوفي خلال الصخر على سرعة الانسياب وعلى مساحة المقطع العرضي لمجرى الانسياب. وحيث إن مساحة المقطع العرضي في هذه الحالة لا تكون مساحة قناة واحدة مفتوحة ، وإنما تعبر عن مساحة نظام متصل من المسام ، فإنه يمكن التعبير عن معدل التصريف باستخدام المعادلة $Q = AV$. فإذا استبدلنا قيمة V في هذه المعادلة بقيمة V في المعادلة رقم (2) ، وهي تشير إلى سرعة الماء في المجرى المائي فإننا نصل لمعادلة جديدة هي :

$$Q = \frac{AK(h_1 - h_2)}{\ell}$$

وهي صورة أخرى لقانون دراسي Darcy's law. فإذا أخذنا مساحة المقطع العرضي (A) كثابت ، فإنه عند قياس أي متغيرين من المتغيرات الثلاثة المتبقية [التصريف (Q) ومعامل النفاذية (K)، والانحدار الهيدروليكي ℓ / (h_1-h_2)] فإنه يمكننا حساب قيمة المتغير الثالث .

III. تصنيف الطبقات الجيولوجية حسب قدرتها على حمل المياه الجوفية

لاتشكل جميع التكوينات الجيولوجية خزانات مياه جوفية (مكامن) ، وذلك يرجع إلى اختلاف هذه التكوينات في خواصها الصخرية والتركيبية . وبالتالي ، يمكن تقسيم التكوينات المختلفة حسب قدرتها على حمل المياه الجوفية إلى الأقسام التالية:

أ. مكامن للمياه الجوفية aquifers وهي طبقات حاملة للمياه الجوفية تتميز بصفتين أساسيتين وهما: 1. القدرة على تخزين المياه في الفراغات الموجودة في الصخور (أي تتميز بمساميتها porosity العالية). و 2. القدرة على إمرار المياه عبر الفراغات الموجودة في الصخور بكميات كبيرة (أي تتميز بنفاذية permeability عالية). ومن أمثلة هذه المكامن الصخور الرملية والرواسب الرملية والوديانية والصخور الجيرية المشققة ، وكذلك الصخور النارية والمتحولة المشققة والمجواة .

ب. طبقات حابسة للماء أو كتيمة aquicludes وهي تكاوين جيولوجية تتميز بصفتين هما:1. القدرة على تخزين المياه في الفراغات الموجودة في الصخور (أي تتميز بمساميتها العالية). و 2. ليس لها قدرة على إمرار المياه عبر الفراغات من مكان إلى آخر بكميات كبيرة (أي تتميز بنفاذية منخفضة) ، ومن أمثلة هذه التكاوين الصخور الطينية .

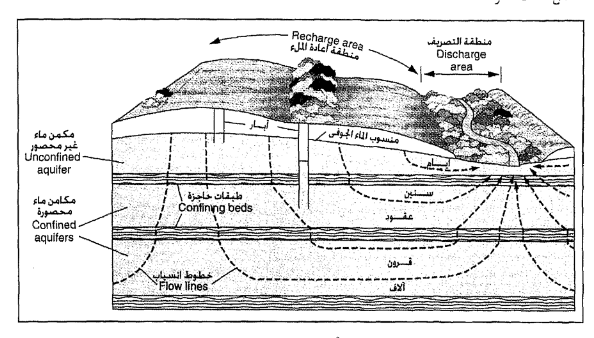
جـ. طبقات صماء aquifuges وهي تكاوين ليس لها قدرة على تخزين أي كمية من الماء ، حيث لايوجد بها أي نوع من الفراغات (منعدمة المسامية) ، وبالتالي فليس لها أي قدرة على إمرار الماء عبر فراغاتها (منعدمة النفاذية) . ومن أمثلة هذه التكاوين الصخور النارية غير المشققة وغير المجواة .

وسيكون اهتمامنا منصبا هنا على النوع الأول والذي يشمل مكامن المياه الجوفية التي تتواجد بكثرة في مصر، مثل الخزانات الموجودة على امتداد وادي النيل والدلتا وخزان الحجر الرملي النوبي تحت الصحراء الغربية والصحراء الشرقية وسيناء ، وكذلك خزانات الحجر الجيري المتشقق والصخور النارية والمتحولة المتشققة أيضا ولكن يلاحظ أن النوعين الأخيرين يكونان محدودي الانتشار والأهمية .

أ. مكامن المياه الجوفية

يطلق على أماكن تواجد المياه الجوفية مصطلح مكمن ماء جوفي **aquifer** (من اللاتينية aqua بمعنى ماء و fer بمعنى يحمل) . ويعرّف مكمن الماء الجوفي بأنه جسم مكون من الصخور أو الحطام الصخري (الأديم) عالي النفاذية يقع في نطاق التشبع ويختزن المياه الجوفية ويسمح بسريانها بكميات تكفي لإمداد الآبار بالماء . و تعتبر طبقات الجرول والرمل والحجر الرملي المنفذ مكامن مياه جوفية جيدة عموما ، لأنها عادة ما تكون عالية النفاذية وتمتد على مساحات كبيرة . ومع ذلك فإن وجود المادة اللاحمة بين حبيبات الحجر الرملي يقلل قطر المسام وتقل بالتالي النفاذية.

ويسمى مكمن الماء الجوفي مكمن ماء غير محصور **unconfined aquifer** عندما ينطبق سطحه العلوي مع منسوب المياه الجوفية نظرا لأنه ممتلىء جزئيا بالماء ، بحيث يلامس بذلك الغلاف الجوي (شكل 5.13) .

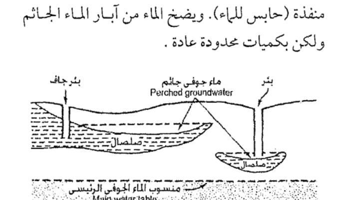


شكل (5.13): ينكشف مكمن الماء غير المحصور على سطح الأرض ، ويمتلىء جزئيا بالماء، ويرتفع الماء فى البئر الضحل إلى مستوى منسوب الماء الجوفى . وينفصل مكمن الماء المحصور عن سطح الأرض بطبقة حاجزة ، ويكون ممتلئا كلية بالماء وتحت ضغط ، ويرتفع الماء فى الآبار فوق المكمن . وتوضح خطوط الانسياب اتجاه انسياب الماء الجوفى. وتشير الأيام والسنين والعقود والقرون وآلاف السنين إلى الوقت المطلوب للماء الجوفى كى يدخل فى مكمن الماء فى مناطق إعادة الملء ، ثم ينساب إلى مناطق التصريف .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

وعندما يجد حابس ماء (طبقة غير منفذة) مكمن مياه جوفية ممتلئًا بالماء من أعلى ومن أسفل ، فإن مكمن المياه الجوفية يسمى مكمن ماء محصور **confined aquifer** ، ويكون انسياب الماء فى هذا المكمن تحت ضغوط عالية. ويرتفع وينخفض منسوب المياه الجوفية فى مكمن الماء غير المحصور خلال الفصول المطرة والجافة ، بينما لا يستجيب مكمن الماء المحصور لأى تغيرات فصلية .

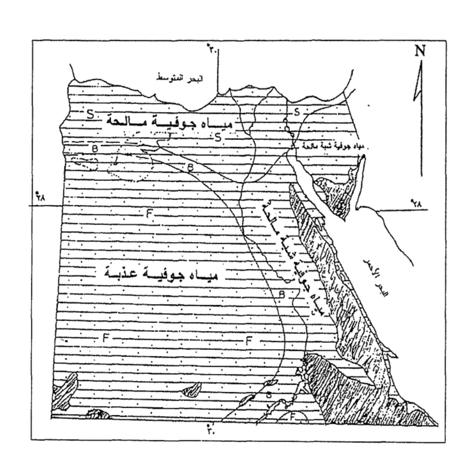
وإذا وجد حابس للماء مثل طبقة من الصلصال قليلة النفاذية فى نطاق التهوية فوق منسوب المياه الجوفية الرئيسى ، فإن الماء المتخلل لأسفل يُصطاد جزء منه ويُحبس ليكوّن نطاق تشبع محليًّا يسمى ماءً جوفيًّا جاثمًا **perched groundwater** يحده منسوب ماء جاثم (معزول) **perched water table** (شكل 6.13) . وتكوّن المياه الجاثمة عدسات صغيرة يطلق عليها عدسة مائية معلّقة . ولكن قد يمتد الماء الجاثم لمئات الكيلومترات المربعة. وقد يكون الماء الجاثم عبارة عن جزء منعزل من الطبقة الحاملة للمياه الجوفية تفصله عن بقية الطبقة صخور قليلة النفاذية أو غير منفذة (حابس للماء). ويضخ الماء من آبار الماء الجاثم ولكن بكميات محدودة عادة .



شكل (6.13): طبقة من الصلصال حابسة للماء موجودة فى نطاق التهوية فوق منسوب الماء الجوفى ، وتحتجز الماء فى مستوى أعلى من منسوب الماء الجوفى ، ويسمى هذا الماء المحتجز بماء جوفى جاثم perched groundwater .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وفى مصر، يعتبر مكمن الحجر الرملى النوبى Nubian Sandstone Aquifer مثالا للمكامن الإقليمية، حيث يشغل مساحات واسعة فى مصر سواء فوق سطح الأرض أو تحت السطح (شكل 7.13) . وهو جزء من نظام إقليمي يمتد عبر الحدود الجغرافية لكل من ليبيا والسودان غربا، وفى كل من فلسطين والأراضى المحتلة والأردن والسعودية شرقا. ويتراوح سمك متكون الحجر الرملى النوبى بين أقل من 500 متر وأكثر من 3000 متر من الحجر الرملى، والذى يتخلله فى مواقع كثيرة طبقات طفلية يتجاوز سمكها مائة متر . وهو يتواجد غالبا فى شكل عدسات تسبب حصرا محليا فى متكون الحجر الرملى النوبى . أما الحصر الإقليمى فتسببه طبقات طفلية سميكة تعرف بطفل الداخلة Dakhla Shale أو طبقات الطفل متعددة الألوان Variegated Shale .



شكل (7.13): توزيع متكونات الحجر الرملى النوبى فى مصر التى تكوّن نظم المياه الجوفية الخاصة بها . F = ماء جوفى عذب، B = ماء جوفى شبه مالح، S = ماء جوفى مالح .
(المصدر: حفنى، كمال وشطا، عبده 2004م: المياه الجوفية فى مصر، وزارة الموارد المائية والرى، جمهورية مصر العربية).

ب. بعض خصائص مكامن المياه الجوفية

تملأ المياه الجوفية الفراغات الموجودة فى الصخور، كما تستطيع هذه المياه المرور فى الصخور من جزء لآخر، وتعرف هاتان الخاصيتان بالمسامية والنفاذية على الترتيب . ونعرض فيما يلى وصفا لهاتين الخاصيتين:

1. المسامية

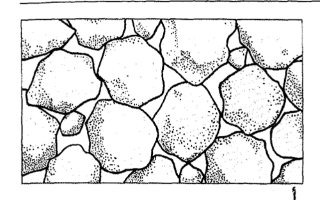
تعرف المسامية porosity بأنها خاصية وجود فراغات أو مسام بين حبيبات الصخور أو الرواسب . وتقدر المسامية بنسبة الحجم الكلى للفراغات إلى حجم الصخر نفسه مضروبا فى مائة (أى النسبة المئوية) . وهذه المسامية هى التى تحدد كمية الماء التى يمكن أن يخزنها حجم معين من الرواسب أو الصخور. وتؤثر أحجام وأشكال حبيبات الصخر ، بالإضافة إلى طريقة كبس (دمج) الحبيبات compactness ، وطريقة ترتيبها فى المسامية (شكل 8.13 أ ، ب) . وقد تصل المسامية فى بعض الرمال أو الجرول gravel جيد الفرز إلى نسبة 20 ٪ ، بينما تصل المسامية فى بعض الصلصال clay المسامى إلى نسبة 50 ٪، رغم أن حجم أى من مسام الصلصال يكون دقيقا جدا عنه فى الرمل والجرول .

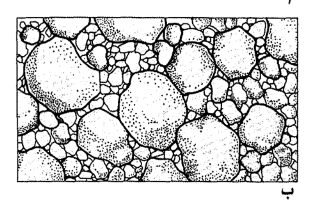
وتتأثر المسامية فى الصخر الرسوبى ليس فقط بالفرز sorting وتعبئة (ترتيب) الحبيبات ، ولكن بالدرجة التى تمتلئ بها المسام بالمادة اللاحمة أيضا (شكل 8.13 جـ) . وعلى الجانب الآخر تكون مسامية الصخور النارية والمتحولة منخفضة وتنتج عن وجود بعض الفواصل والكسور بها .

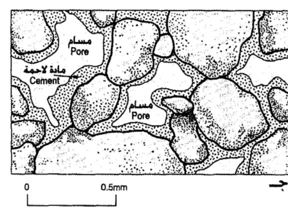
2. النفاذية

تعرف النفاذية permeability (من اللاتينية permeare بمعنى يخترق أو ينفذ إلى) بأنها قابلية الصخر لإمرار سائل خلال مسامه . ولا تعنى المسامية العالية بالضرورة وجود نفاذية عالية ، لأن حجم ومدى اتصال المسام ببعضها يؤثران على النفاذية بطريقة هامة.

وتلعب العلاقة بين حجم المسام والالتصاق الجزيئي molecular attraction لأسطح الصخر دورا كبيرا فى تحديد نفاذية الصخر. والالتصاق الجزيئى هو قوة توجد بين سطح الجسم الصلب وغلالة رقيقة من الماء ، حيث تتسبب هذه القوة فى التصاق هذه الغلالة بسطح الصخر ، على الرغم من قوة الجاذبية

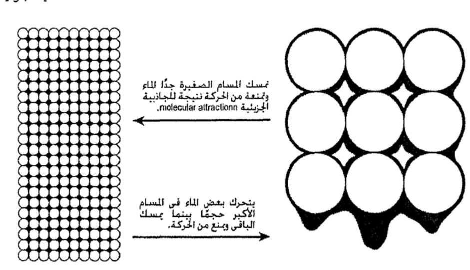

أ


ب



جـ

شكل (8.13): المسامية porosity فى الرواسب المختلفة .
أ. راسب جيد الفرز تصل المسامية فيه إلى 30٪
ب. راسب ردىء الفرز تكون المسامية فيه 15٪ ، حيث تملأ الحبيبات الدقيقة الفراغات بين الحبيبات الكبيرة
جـ. تنخفض المسامية أيضا فى راسب عالى المسامية نتيجة ملء المادة اللاحمة للمسام بين الحبيبات .
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).



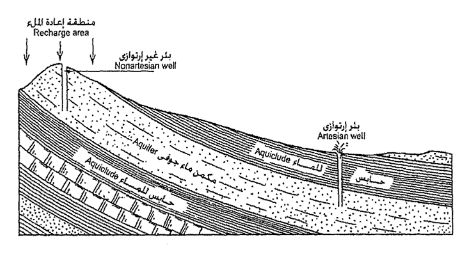
شكل (9.13): تأثير الجاذبية الجزيئية molecular attraction فى مسام مختلفة الأقطار .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الأرضية. فإذا كانت المسافة المفتوحة بين الحبيبات المتجاورة فى الصخر صغيرة بدرجة ملحوظة فان الغلالات الرقيقة من الماء والملتصقة بالحبيبات تتلامس مع بعضها البعض . لذلك يمتد تأثير قوة الالتصاق الجزيئى عبر المسام (شكل 9.13). وعند الضغوط العادية يلتصق بعض هذا الماء بقوة بجدر الحبيبات ، ولذلك تكون النفاذية منخفضة . والصلصال هو مثال لتلك الرواسب ، حيث يبلغ حجم حبيباته أقل من 0.005 مم. وعلى الرغم من أن الصلصال عالى المسامية إلا أن الحجم الصغير جدا للمسام يجعل نفاذية الصلصال منخفضة . وعلى العكس من ذلك ، ففى الرواسب التى تحتوى على حبيبات كبيرة مثل الرمل (حجم الحبيبة بين 0.06 إلى 2 مم) فإن المسام تكون عادة أكبر من سمك غلالات الماء الملتصقة بالحبيبات المتجاورة . ولذلك فإن المياه فى مركز المسام تكون حرة الحركة (شكل 9.13) ، ومثل هذه الرواسب تكون منفذة . وتزداد النفاذية بزيادة أقطار المسام، وبالتالى فإن الجرول يكون أكثر نفاذية من الرمل لوجود مسام كبيرة جدا به، ولذا يمكن ضخ كميات كبيرة من الماء منه .

جـ. الانسياب الارتوازى

تنتقل المياه الجوفية فى مكمن الماء غير المحصور خلال الطبقات المنفذة التى تمتد إلى سطح الأرض فى مناطق إعادة الملء والتصريف . ويكون مستوى الخزان فى مكمن الماء غير المحصور هو ارتفاع مستوى الماء الجوفى نفسه ، أما فى مكمن الماء المحصور، فإن الماء لا يمكن أن ينساب خلال الطبقة غير المنفذة للماء أو ينساب خلالها ولكن ببطء شديد . ولكن ينساب الماء تحت ضغط خلال الطبقة المنفذة والحاوية للماء والمحصورة من أعلى ومن أسفل بالطبقات غير المنفذة . وتمنع الطبقات غير المنفذة ، والتى تقع فوق مكمن الماء المحصور ، مياه الأمطار من التسرب إلى أسفل . ويتم إعادة ملء مكمن الماء المحصور من تساقط الماء فوق منكشفه ، حيث تدخل مياه الأمطار إلى الأرض وتنتقل لأسفل إلى مكمن المياه الجوفية (شكل 10.13) ، حيث يكون انسياب الماء تحت ضغط . ويعرف هذا الانسياب بأنه انسياب ارتوازى **artesian flow** ويكون الضغط عند أى نقطة فى مكمن الماء مساويا لوزن كل الماء فوق تلك النقطة . فإذا حُفِر بئر فى مكمن ماء



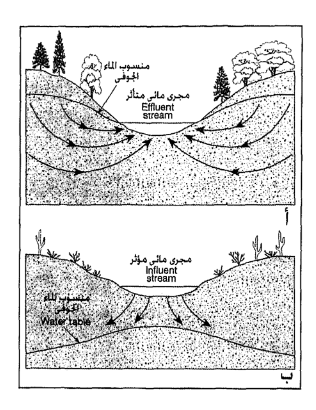
شكل (10.13): شكل توضيحى لبيان الظروف التركيبية اللازمة لتكون آبارًا ارتوازية .
يلزم تحقق شرطان لتكون نظام ارتوازى هما وجود مكمن مائى aquifer مائل وضغط مائى يكفى لرفع الماء فى البئر فوق المكمن المائى ، بالإضافة إلى أن حافة منطقة إعادة الملء تكون مكشوفة .

(After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

محصور عند نقطة بحيث يكون ارتفاع سطح الأرض أقل من ارتفاع منسوب المياه الجوفية فى منطقة إعادة الملء ، فإن الماء ينساب خارج البئر تلقائياً . وتعرف مثل هذه الآبار بالآبار الارتوازية **artesian wells** . ولا تحتاج مثل هذه الآبار إلى طاقة لضخ الماء إلى السطح ، حيث يسبب الفرق فى الضغط بين منسوب الماء الأرضى عند منطقة إعادة الملء ومستوى البئر أن يرتفع الماء فى البئر. ويأتى مصطلح ارتوازى artesian من اسم المدينة الفرنسية أرتوا Artois والتى تم فيها دراسة الانسياب الارتوازى لأول مرة . وبالمثل ، فإن الينبوع المنساب طبيعياً من مكمن ماء ارتوازى يعرف بأنه ينبوع ارتوازى artesian spring. وتحت بعض الظروف غير العادية، فإن ضغط الماء الارتوازى قد يكون مرتفعاً بدرجة تؤدى إلى تكوّن نافورات ترتفع إلى 60 متراً فوق سطح الأرض.

IV. العلاقة بين مكامن المياه الجوفية والمياه السطحية

يدخل الماء إلى نطاق التشبع ويغادره فى عمليتين يطلق عليهما عمليات إعادة الملء والتصريف . فعملية **إعادة الملء recharge** هى تخلل الماء فى أى متكون صخرى تحت سطح الأرض . ويتم غالبا إعادة الملء من رشح ماء المطر أو الجليد المنصهر من سطح الأرض. وقد يعاد الملء أيضا من خلال قاع مجرى مائي، حيث تقع قناة المجرى المائى عند مستوى أعلى من منسوب المياه الجوفية . ويسمى المجرى المائى الذى تتسرب مياهه لتغذى نطاق التشبع تحته **بمجرى مائى مؤثر** (نهر مغذٍ) **influent stream** . ويندر وجود الأنهار المغذية فى المناطق القاحلة ، حيث يكون منسوب المياه الجوفية عميقا (شكل 11.13 أ) . وفى مصر يعتبر نهر النيل مجرى مائيا مؤثرا ؛ حيث تعتمد المياه الجوفية فى مكمن المُغرة Moghra aquifer (والذى يمتد لمسافات شاسعة غرب دلتا نهر النيل) على التسرب من نهر النيل . ولذلك تكون ملوحة الماء منخفضة قرب دلتا نهر النيل (حوالى 350 جزءا فى المليون) ثم تزداد بالتدريج غربا لتصل إلى حوالى 10000 جزء فى المليون.



شكل (**11.13**):

أ) مجرى مائى متأثر يميز المناطق الرطبة، حيث يتغذى المجرى المائى من الماء الجوفى.

ب) مجرى مائى مؤثر (نهر مغذٍ) يوجد فى الصحارى. ويعمل الماء من تلك المجارى المائية على رفع منسوب الماء الجوفى.

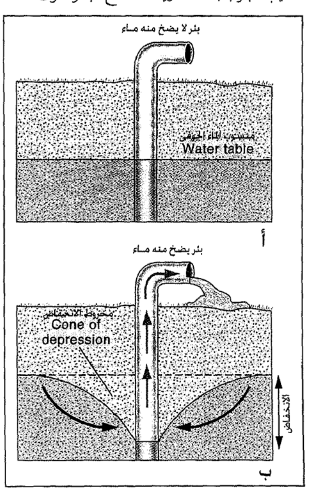
(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

أما التصريف **discharge** فهو عكس إعادة الملء، وهو مصطلح يطلق على عملية خروج الماء الجوفى من نطاق التشبع إلى المجارى المائية أو البحيرات أو المستنقعات عند السطح. وعندما تقطع قناة مجرى مائى منسوب المياه الجوفية، ينصرف الماء من نطاق التشبع إلى المجرى المائى. ويلاحظ أن قاع المجرى المائى يقع فى منسوب منخفض عن منسوب المياه الجوفية. ويميز المجرى المائى المتأثر **effluent stream** المناطق الرطبة (شكل 11.13ب). وتستمر المجارى المائية المتأثرة فى الانسياب لفترة طويلة حتى بعد توقف سقوط الأمطار، حيث تُغذّى من المياه الجوفية. وهكذا فإن خزان الماء الجوفى قد يزوّد بالماء من المجارى المائية المؤثرة، بينما يستنفد بالمجارى المائية المتأثرة.

أ. التوازن بين إعادة الملء والتصريف

عندما تتوازن عمليتا إعادة الملء والتصريف، فإن خزان المياه الجوفية ومنسوبه يبقيان ثابتين فى الظروف الطبيعية، حتى مع استمرار انسياب الماء إلى الخزان. ولكى تتوازن عمليتا إعادة الملء والتصريف فإن ماء المطر يجب أن يكون متكررا باستمرار بدرجة تكفى لتعادل كمية الماء المنصرف من الأنهار، بالإضافة إلى الماء المتدفق من الآبار والينابيع. وحيث إن كميات التساقط تتغير من فصل لآخر، فإن التوازن بين إعادة الملء والتصريف لن يبقى ثابتا. وعموما فإن مستوى الماء

الجوفى ينخفض فى الفصول الجافة ويرتفع فى الفترات الرطبة (شكل 3.13) . كما تؤدى زيادة التصريف ، والتى تحدث عادة نتيجة زيادة الضخ من الآبار إلى عدم الاتزان . وقد تنتهى الآبار الضحلة عندما يكون ضخ الماء من البئر أسرع من إعادة تزويد خزان الماء الجوفى بالماء فينخفض مستوى الماء فى البئر على شكل مساحة مخروطية تحيط بالبئر ، **تعرف بمخروط الانخفاض cone of depression** (شكل 12.13)، وينخفض مستوى الماء فى البئر إلى المستوى المنخفض لمنسوب الماء الجوفى . وإذا امتد مخروط الانخفاض تحت قاع البئر أصيب البئر بالجفاف . وإذا كان قاع البئر فوق قاعدة



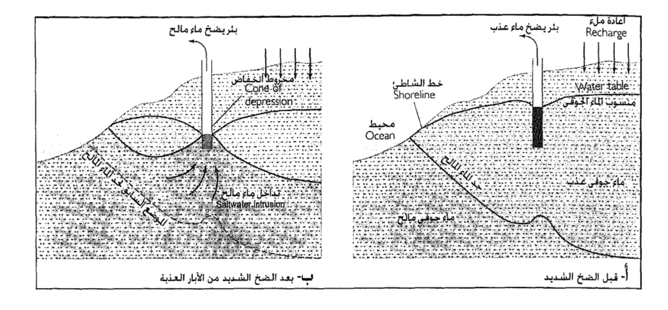
شكل (**12.13**): يؤدى ضخ الماء من البئر إلى انخفاض منسوب الماء الجوفى فى هيئة مخروط يحيط بالبئر ويعرف بمخروط الانخفاض.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition.

خزان الماء الجوفى فإن زيادة عمق البئر فى الخزان تسمح لمزيد من الماء بالتدفق من البئر ، حتى عند معدلات ضخ عالية . وإذا زاد عمق البئر إلى الدرجة التى يستنفد بها كل خزان الماء الجوفى ، واستمرت عملية الضخ ، فإن مخروط الانخفاض يمكن أن يصل إلى قاع خزان الماء الجوفى ويستنفده . ويتحسن وضع خزان الماء الجوفى بخفض معدل الضخ بدرجة تكفى لإعادة ملء الماء .

ولا يؤدى السحب الشديد للماء لاستنفاد ماء الخزان الجوفى فقط ، ولكن قد يسبب تأثيرا آخر غير مرغوب فيه . حيث تهبط المواد التى كانت تعلو خزان الماء الجوفى فى السابق وينخفض سطح الأرض نتيجة لذلك بسبب انخفاض ضغط الماء فى المسام . ويعتمد مقدار الهبوط على مدى انخفاض ضغط الماء وعلى سمك خزان الماء الجوفى ومدى ضغط الرواسب فيه . وينتشر هبوط سطح الأرض فى جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية حيث أدى ضخ وزيادة سحب الماء الجوفى إلى تمزق سطح الأرض وانهيار المبانى والطرق والجسور وتخريب الكابلات الكهربائية المدفونة وأنابيب الصرف وزيادة المساحات المعرضة للفيضان .

وقد يكون انخفاض سطح الأرض مدمرا خاصة عندما يُضخ الماء من تحت المدن . ومن الأمثلة المشهورة على ذلك مدينة مكسيكوسيتى ، حيث أدى ضخ الماء من الرواسب إلى تحرك عديد من المبانى وميلها نتيجة هبوط سطح الأرض . ويمثل برج بيزا المائل الشهير فى إيطاليا والذى مال بسبب هبوط سطح الأرض مثالا آخر ، حيث بُنى البرج على سهل فيضى مكونٍ من رواسب دقيقة الحبيبات . وبدأ البرج فى الميل نتيجة السحب المتزايد للمياه الجوفية من خزانات المياه العميقة المحيطة به . وقد أُعد تصميم لتقوية الأساسات لتحفظ البرج مستقرا فى المستقبل ، ولكن مع ضرورة الحفاظ على المستوى نفسه من التحكم فى المياه الجوفية .



شكل (13.13): يتحدد الحد الفاصل بين الماء العذب والمالح على امتداد خط الشاطئ من التوازن بين إعادة الملء recharge والتصريف discharge فى خزان الماء العذب .

أ) وفى العادة ، فإن ضغط الماء العذب يحفظ حد الماء المالح فى اتجاه البحر قليلا .

ب) يعمل الضخ الشديد على خفض ضغط الماء العذب ، مما يسمح لحد الماء المالح بالتحرك جهة اليابسة . ويؤدى هذا التحرك ليس فقط إلى تكون مخروط انخفاض يحيط بالبئر ، ولكن إلى تكون مخروط انخفاض آخر مقلوب يدخل الماء المالح فى البئر . ويتحول بالتالى البئر الذى كان يضخ ماءً عذبا إلى أن يضخ ماءا مالحا .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويواجه السكان الذين يعيشون بالقرب من الشواطئ المطلة على المحيطات والبحار مشكلة أخرى حينما يكون معدل الضخ مرتفعا بالنسبة لإعادة الملء ، مما يؤدى إلى غزو ماء البحر للآبار كما سبق شرحه . ويوجد بالقرب من خط الشاطئ (أو فى منطقة الساحل المغمور على مسافة من الشاطئ) حد يفصل بين الماء المالح والماء العذب تحت سطح الأرض ، بحيث ينحدر هذا الحد ناحية اليابسة وأسفلها ، ويعلو الماء العذب فوق الماء المالح فى خزان الماء الجوفى (شكل 13.13 أ). ويوجد الماء الجوفى العذب تحت عدد من الجزر فى المحيط على هيئة عدسات تطفو فوق قاعدة من ماء البحر ، لأن الماء العذب يكون أقل كثافة من ماء البحر (1.00جم/ سم^3 مقابل 1.02 جم / سم^3 وهذا فرق صغير ولكن مهم) . وبالطبع فإن ضغط الماء العذب يحافظ على حد الماء المالح بعيدا قليلا عن الشاطئ .

ويحافظ التوازن بين إعادة الملء والتصريف فى خزانات الماء العذب على هذا الحد الفاصل بين الماء العذب والماء المالح ، طالما أن إعادة الملء بماء المطر تكافئ التصريف بالضخ على الأقل مما يؤدى إلى أن يضخ البئر ماءا عذبا . ولكن عندما يكون سحب الماء أسرع من إعادة الملء فإنه يتكون مخروط انخفاض عند قمة خزان الماء الجوفى يقابله مخروط آخر مقلوب يرتفع من أسفل الحد بين الماء العذب والماء المالح . ويؤدى مخروط الانخفاض عند الجزء العلوى من خزان الماء الجوفى إلى صعوبة ضخ ماء عذب ، بينما يؤدى المخروط السفلى إلى تسرب ماء مالح عند قاعدة البئر (شكل

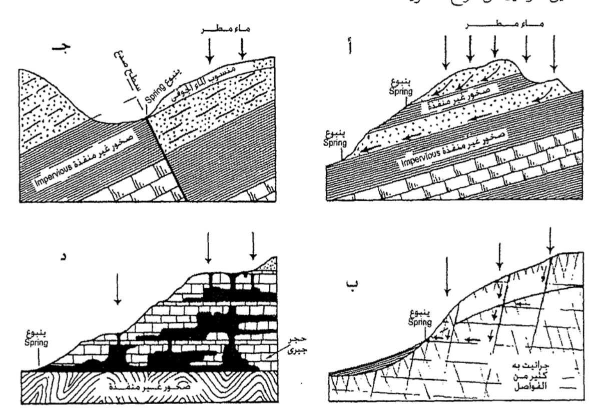
13.13 ب) . ويكون السكان المقيمون بالقرب من شاطئ البحر أول من يتأثر بزيادة ملوحة الماء ، حيث لا يمكن التغلب على تلك المشكلة إلا بتقليل ضخ الماء أو إعادة ملء خزان الماء الجوفى صناعيا من المياه الجارية.

ب. التصريف الطبيعى (الينابيع) والصناعى (الآبار)

يحصل الناس عموما على احتياجاتهم من المياه الجوفية إما من الينابيع الطبيعية أو بحفر الآبار التى تصل إلى خزان الماء تحت سطح الأرض . ونعرض هنا لكلا هذين النوعين من أنواع التصريف :

1. الينابيع

يعرف **الينبوع spring** بأنه انسياب المياه الجوفية بحيث ينفذ طبيعيا عند سطح الأرض . وأبسط أنواع الينابيع هو الذى ينفذ عندما يتقاطع سطح الأرض مع منسوب المياه الجوفية (شكل 14.13). ويمكن أن توجد الينابيع الصغيرة فى كل أنواع الصخور ، ولكن معظم الينابيع الكبيرة تخرج غالبا من اللابة أو الحجر الجيرى أو الجرول .



شكل (**14.13**): شكل الظروف المختلفة التى تؤدى إلى تكون العيون أو الينابيع springr .

أ. يتخلل الماء طبقات الرمل المسامى التى تعلوها طبقة من الصلصال محدودة النفاذية فينساب الماء جانبيا وينفذ كينبوع .

ب. يدخل الماء فى صخر كتلى كالجرانيت به كثير من الفواصل ليخرج منها الماء .

جـ. يتسبب الصدع فى وجود طبقة منفذة أمام الطفل غير المنفذ ، فيحتجز الماء ويخرج على امتداد سطح الصدع .

د. يدخل الماء فى فواصل الحجر الجيرى ، فتتسع تلك الفواصل بمرور الوقت بسبب ذوبان الحجر الجيرى حولها ، وتتكون كهوف وفراغات تحت سطح الأرض ، ويتجمع فيها الماء ويخرج كينبوع .

(After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

ويكون التغير الأفقى أو الرأسى فى النفاذية سببا شائعا لوجود الينابيع (شكل 10.13). وغالبا ما ينتج هذا التغير فى النفاذية عن وجود جسم من صخر غير منفذ أو أقل نفاذية بدرجة كبيرة مجاور لصخر آخر منفذ. فإذا كان هناك رمل مسامى يعلو حابسًا للماء مكون من صلصال أقل نسبيا فى درجة النفاذية ، فإن الماء المتخلل لأسفل خلال الرمل ينساب جانبيا حينما يصل إلى الصلصال الموجود أسفله ، حيث ينفذ كينبوع. ويقطع الحد الاستراتجرافى (الطبقى) بين الوحدتين سطح الأرض ، على امتداد جانب وادى أو جرف cliff (شكل 14.13 أ) . وقد تنفذ الينابيع أيضا من صخر نارى كتلى مثل الجرانيت به كثير من الفواصل (شكل 14.13 ب) . كما توجد الينابيع أيضا على امتداد خطوط الصدوع (شكل 14.13جـ) ، أو فى صخور بها كهوف مثل الحجر الجيرى (شكل 14.10 د) ، مثل تلك التى توجد فى واحة سيوة وجنوب القطارة وحلوان ووادى الريان بمصر . وقد أظهرت الدراسات وجود أكثر من 1400 ينبوع بمصر يتدفق منها الماء بدرجات متفاوتة ، كما تختلف فى درجات حرارتها ، وقد تصل إلى 70°م فوق سطح الأرض ، مثل تلك التى توجد فى ينبوع حمام فرعون على الجانب الشرقى لخليج السويس والعين السخنة على الجانب الغربى لخليج السويس وبير قفار فى منخفض القطارة .

2. الآبـــار

البئر well هو حفرة صناعية دائرية عادة ومبطنة الجوانب ، حفرت إلى عمق كبير تحت منسوب المياه الجوفية يُسحَب أو يُضَخ الماء منها إلى سطح الأرض . ويوضح شكل (3.13) أن البئر الضحل يجف عندما يصبح منسوب المياه الجوفية منخفضا ، بينما ينتج البئر العميق المجاور الماء على طول العام .

وعندما يبدأ ضخ الماء من بئر جديدة ، فإن معدل السحب يزيد فى البداية عن معدل انسياب المياه الجوفية محليا . وكما ذكرنا سابقاً ، فإن عدم الاتزان فى معدلات الانسياب يؤدى إلى تكوّن انخفاض مخروطى فى منسوب المياه الجوفية يحيط مباشرة بالبئر ، ويسمى مخروط الانخفاض cone of depression(شكل 12.13).

V. نوعية (درجة جودة) الماء وتلوث المياه الجوفية

يعتقد قاطنو المناطق الصناعية الحديثة أن ماء الصنبور آمن وصالح للشرب . ولكن ماء الشرب قد يكون ملوثا بشدة ولا يصلح للاستهلاك الآدمى بسبب وجود مواد ذائبة به مصدرها النفايات الآدمية والصناعية.

أ. كيميائية المياه الجوفية

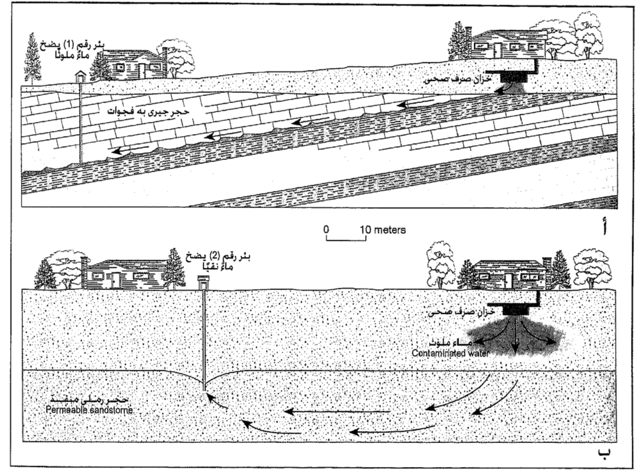
تُظهر تحاليل عديد من الآبار والينابيع أن المركبات الذائبة فى الماء الجوفى هى أساسا كلوريدات وكبريتات وبيكربونات لعناصر الكالسيوم والماغنسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والحديد. وترجع آثار هذه المواد إلى المعادن الشائعة فى الصخور والتى تم تجويتها . ويتغير تركيب المياه الجوفية كما هو متوقع ، من مكان لآخر ، حسب نوعية الصخر الذى يتواجد به الماء . ففى وسط الولايات المتحدة الأمريكية يكون معظم الماء غنيا ببيكربونات الكالسيوم والماغنسيوم والتى أذيبت من صخور الحجر الجيرى وحجر الدولوميت فى تلك المناطق . وعند استخدام مثل هذا الماء ، والذى يسمى ماءا عسراhard water فإنه لا يكوّن رغوة مع الصابون بسهولة ، بينما يكوّن قشوراً فى الغلايات عندما يتبخر منها ، كما قد تتكون مثل هذه القشور فى أنابيب المياه ، مما يقلل فى النهاية من انسياب الماء . وعلى عكس الماء العسر ، فإن الماء الذى يحتوى على القليل من

المواد المذابة وكذلك القليل من الكالسيوم يسمى ماءً يسرًا soft water ، وهو ماء يكوّن رغوة مع الصابون العادى بسهولة . ويتواجد مثل هذا الماء فى وادى النيل والدلتا حيث تكثر الصخور البركانية وصخور الجريواكى فى مناطق منابع النيل .

ويذيب الماء الجوفى عناصر ضارة بالصحة من الصخور التى ينساب خلالها مما يجعل الماء غير مناسب للاستهلاك الآدمى . فالماء الذى يتخلل صخوراً غنية فى الكبريت قد يحتوى على كبريتيد الهيدروجين (H_2S) والذى يجعل له رائحة مثل رائحة البيض الفاسد ، على الرغم من أنه غير ضار صحيا . وفى بعض المناطق القاحلة ، فإن تركيز الكبريتات والكلوريدات المذابة قد يكون عاليا لدرجة أن الماء الجوفى يكون ضارا بالصحة. وفى المناطق الجافة (القاحلة) يذيب الماء الجوفى المتحرك فى صخور رسوبية مسامية الأملاح التى تترسب نتيجة بخر الماء فى نطاق التهوية ، مما يؤدى إلى تكوّن تربة مالحة غير صالحة للزراعة.

ب. التلوث بمخلفات المجارى

تعتبر مخلفات المجارى أكثر مصادر تلوث المياه الجوفية شيوعا . ويؤدى التسرب من خزانات المجارى



شكل (15.13):

أ. على الرغم من أن الماء الملوث يتحرك لمسافة تزيد عن 100 متر قبل أن تصل إلى البئر، إلا ان الماء يتحرك بسرعة خلال الحجر الجيرى الملىء بالفجوات دون أن ينقى من الشوائب .

ب. يتخلل الماء الملوث فى حجر رملى منفذ وينقى خلال مسافة قصيرة نسبيا .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

وشبكاتها غير المحكمة ، وإلقاء المخلفات فى المناطق المفتوحة إلى تلوث المياه الجوفية . وعند مرور المياه الملوثة ببكتريا مخلفات المجارى على صخر أو راسب ذى مسام كبيرة مثل جرول خشن أو حجر جيرى به كثير من الفجوات البينية الواسعة فإن الماء يتخلل بها لمسافات كبيرة ولكنه يبقى ملوثاً (شكل 15.13 أ). ومن ناحية أخرى ، فإن الماء الملوث إذا تخلل فى رمل أو حجر رملى منفذ ، فإنه قد ينقى خلال مسافة قصيرة ، قد تصل فى بعض الأحيان إلى أقل من 30 متراً من موقع حدوث التلوث (شكل 15.13 ب). ويعتبر الرمل عامل تنقية مناسب حيث يُنقى الماء من خلال (1) الترشيح ميكانيكيا ، حيث يتم التخلص من معظم البكتريا عند مرور الماء فى الرمل ، (2) أكسدة البكتريا بحيث تصبح غير ضارة ، (3) يؤدى تلامس البكتريا مع كائنات عضوية أخرى إلى التهام البكتريا . ولذلك ، فإن مشروعات تنقية مصادر المياه ومخلفات المجارى تعتمد على تخلل هذه السوائل فى الرمل.

ج . النفايات السامة والسموم الزراعية

تلقى فى كل عام كميات ضخمة من النفايات البشرية والصناعية فى أماكن مفتوحة أو تُدفن تحت سطح الأرض بتلك الأماكن التى يطلق عليها المرادم البرية landfill . وعندما يمتلئ هذا المردم البرى ، فإنه يُغطى بالأوساخ ، وتتسرب مياه الأمطار فى رواسب المردم ، فتتحرك وتنتقل العديد من نواتج هذه النفايات تحت سطح الأرض ، حيث تحمل المياه المواد الذائبة بعيداً. وبهذه الطريقة ، فإن الكيماويات السامة تَرشَح ببطء لتدخل مكامن المياه الجوفية وتلوثها ، مما يجعل هذه المياه غير مناسبة للاستخدام الآدمى . وتنتقل الملوثات من هذه المواقع على هيئة تيارات من الماء الملوث فى اتجاهات تعتمد أساساً على نمط الانسياب الإقليمى للماء الجوفى لتنتشر بمعدل انتشار المياه المتخللة نفسه. وغالباً ما تكون هذه الملوثات سامة للإنسان والنباتات والحيوانات أيضاً . وقد أصبحت مشكلات التلوث فى مواقع النفايات المطمورة (المرادم البرية) خطيرة لدرجة أن عديدًا من الحكومات بدأت برامج طويلة الأمد لتنظيف هذه المواقع حتى تصبح آمنة بيئياً.

وتُرش الحقول بالكثير من المبيدات لمقاومة الحشرات والطحالب لتحسين نوعية الإنتاج . وقد ارتبطت بعض هذه الكيماويات بالأمراض الخبيثة والتخلف العقلى فى الإنسان ، كما أدى بعضها إلى نقص أعداد الحيوانات البرية ، حيث حدث أيضاً انخفاض كبير فى أعداد طائر « أبو قردان » نتيجة رش المبيدات فى مصر . وتصل هذه الكيماويات السامة إلى المياه الجوفية بسبب الأسلوب الذى ترش به هذه المبيدات على مساحات شاسعة.

د. تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض

إن أحد المشاكل البيئية التى تقلق الدول الصناعية ، ضرورة التعامل مع المخلفات الصناعية شديدة السمية. ويؤدى الطمر (الدفن) السطحى السريع إلى تلوث مصادر المياه السطحية وتحت السطحية ، وبالتالى إمكانية حدوث مشكلات صحية خطيرة . كما أن الدول ذات الإمكانات النووية لها مشاكلها الخاصة بالتخلص من نواتج النفايات ذات الإشعاع العالى الدرجة. فبعض النظائر مثل ^{90}Sr و ^{137}Ce تكون مشعة بدرجه عالية لدرجة أن أى كمية ضئيلة منها يمكن أن تسبب وفاة الناس إذا تركزت فى البيئات السطحية.

وقد توصلت معظم الدراسات الخاصة بالتخلص من النفايات السامة – سواء السامة أو المشعة – إلى أن التخزين تحت الأرض يكون مناسباً عند وجود أماكن آمنة . فالشرط الأساسى فى حالة النفايات المشعة

بدرجة عالية والتى يمكن أن تبقى خطيرة لعشرات أو مئات أو آلاف السنين بسبب فترة نصف – العمر الطويل لبعض النظائر المشعة ، أن يكون الموقع مستقراً على مدى زمنى طويل . لذلك ، فإن المناطق الآمنة تماماً للتخلص من النفايات المشعة والحاويات التى توضع فيها تلك النفايات هى المناطق التى لا تتأثر كيميائياً بالمياه الجوفية ، كما لا تتأثر طبيعياً بالزلازل أو بالنشاط البشرى .

وهناك اتفاق عام بين الجيولوجيين على أن تخزين النفايات المشعة تحت الأرض لابد أن يخضع للشروط التالية:

1. يجب أن تكون نفاذية الصخور منخفضة أو منعدمة، وأن تكون الكسور بها قليلة أو منعدمة .
2. يجب ألا تكون هناك إمكانة لتواجد خامات معدنية ذات قيمة اقتصادية فى الصخر الحاوى سواء حاليا أو مستقبلا.
3. يجب أن يكون انسياب الماء الجوفى المحلى بعيداً عن الغلاف الحيوى .
4. يجب أن تكون كمية الأمطار المتساقطة قليلة .
5. يجب أن يكون نطاق التهوية سميكا.
6. يجب أن يكون معدل التعرية بطيئا جداً.
7. يجب أن يكون احتمال النشاط الزلزالى أو البركانى منخفضا جداً.

ويمثل التخزين الآمن لفترة طويلة تحت الأرض تحديا كبيراً للجيولوجيين ، حيث درس الجيولوجيون الأحداث الماضية ، وهم مطالبون الآن بالتنبؤ بأحداث المستقبل الممكنة. ويتطلب ذلك معرفة جيدة بمدى استجابة أنظمة الماء الجوفى المعقدة لحركات القشرة والتغيرات المناخية المحلية والعالمية والعوامل الطبيعية الأخرى التى يمكن أن تؤثر على استقرار موقع التخزين.

VI. العمل الجيولوجى للمياه الجوفية

تعمل المياه الجوفية فى المناطق المغطاة بصخور معرضة للتجوية الكيميائية على تكون معالم أرضية مميزة تعتبر من أكثر معالم القشرة الأرضية جمالاً وروعة. ونعرض هنا بعضا من هذه المعالم .

أ. الذوبان

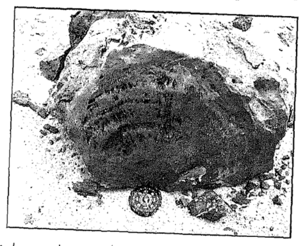
عندما تصل مياه الأمطار إلى سطح الأرض تبدأ فى التفاعل مع المعادن فى الحطام الصخرى (الأديم) وصخور الأساس وتعمل على تجويتها كيميائياً . ومن العمليات المهمة المترتبة على تلك التجوية الكيميائية ذوبان المعادن والصخور فى السوائل المارة خلالها . وتعتبر الصخور الكربوناتية أكثر صخور القشرة الأرضية قابلية للتأثر بهذه العملية . وصخور الحجر الجيرى وحجر الدولوميت والرخام هى أكثر صخور الكربونات شيوعاً ، حيث تغطى ملايين الكيلومترات المربعة من سطح الأرض . وبالرغم من أن معادن الكربونات تكون غير قابلة للذوبان تقريباً فى المياه النقية ، إلا أنها تذوب بسهولة فى حامض الكربونيك (انظر الفصل السابع) الذائب فى ماء المطر المتخلل . ونتيجة لذلك ، فإن المياه الجوفية تصبح محملة بكاتيونات الكالسيوم وأنيونات البيكربونات. وتحدث التجوية أساساً على امتداد الفواصل والكسور الأخرى فى صخور الأساس الكربوناتية ، حيث تكون النتيجة مؤثرة. وقد تؤدى تجوية الحجر الجيرى إلى أن يذوب تماما وينتقل إلى المياه الجوفية المتحركة ببطء.

وقد قدر الجيولوجيون المعدل الذى تنخفض به طوبوغرافية الصخور الكربوناتية نتيجة الذوبان ، فوجدوا أنها تنخفض بمعدل يصل إلى 10مم/ 1000 سنة فى المناطق المعتدلة التى تتساقط فيها الأمطار بمعدل عال وتتميز بمنسوب ماء جوفى مرتفع مع غطاء دائم تقريباً من النباتات. وتكون هذه المعدلات

منخفضة جداً فى المناطق الجافة التى تندر فيها الأمطار ، ويكون منسوب الماء الجوفى فيها منخفضا ، والغطاء النباتى غير دائم .

ب. التلاحم والإحلال الكيميائى

إن تحول الرواسب إلى صخر رسوبى يكون أساساً نتيجة عمل المياه الجوفية. ومثلما تكون الرواسب المتواجدة تحت البحر مشبعة عموماً بالماء ، كذلك تكون الرواسب المتواجدة فى نطاق التشبع تحت سطح الأرض . وتترسب المواد الذائبة فى الماء كمادة لاحمة فى الفراغات بين حبيبات الصخور وحبيبات المعادن فى الرواسب. وكما أوضحنا فى فصل الصخور الرسوبية ، فإن هذه العملية تسمى عملية مابعد الترسيب diagenesis وهى تحول الرواسب المفككة إلى صخر متماسك . ويعتبر الكالسيت والكوارتز ومركبات الحديد (أساساً هيدروكسيدات مثل الليمونيت) مواد لاحمة أساسية .



شكل (16.13): الخشب المتحجر من الأوليجوسين فى مصر . طريق الواحات البحرية – الصحراء الغربية – مصر (د. ضياء الدين محمد كامل – قسم الجيولوجيا – جامعة الأزهر) .

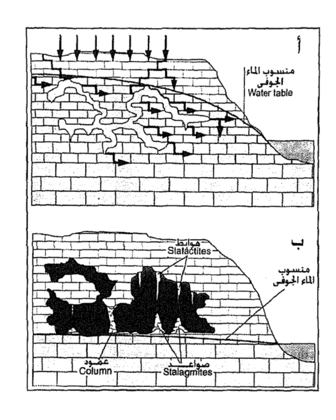
والعملية الأقل شيوعاً من ترسيب المادة اللاحمة بين حبيبات الرواسب هى عملية **الإحلال replacement** ، وهى العملية التى يذيب فيها السائل المادة الموجودة وقت الإحلال ويُرسّب من المحلول فى الوقت نفسه حجما مساويا من مادة مختلفة . ومن الواضح أن عملية الإحلال تحدث على أساس إحلال حجم ما مكان حجم آخر مساو ، حيث تحفظ المادة الجديدة أدق أنسجة المادة التى تم إذابتها وإحلالها. ويمكن أن يتم إحلال كل من المواد المعدنية والعضوية ، فالخشب المتحجرpetrified wood هو أشهر أمثلة إحلال المادة العضوية (شكل 16.13).

جـ. الكهوف والمغارات الكربوناتية

جذبت الكهوف caves اهتمام الناس منذ أمد طويل . وتعتبر كهوف الحجر الجيرى فى أوروبا وآسيا من أقدم الشواهد على إقامة إنسان العصر الحجرى القديم فى الكهوف خلال أزمنة البليستوسين الجليدية ، حيث كانت حوائط هذه الكهوف محل فحص دقيق من المختصين والمهتمين بعصور ما قبل التاريخ .

وتأخذ الكهوف عدة أحجام وأشكال . وعلى الرغم من أن معظم الكهوف تكون صغيرة ، إلا أن بعضها يكون ذا أحجام استثنائية . ويسمى الكهف الكبير جدا أو المكون من عدة حجرات كهفية متصلة ببعضها بالمغارة cavern . وتضم مغارات كارلسباد فى نيومكسيكو حجرة واحدة يبلغ طولها 1200م وعرضها 190م وارتفاعها 100م. ويتكون كهف ماموث فى كنتكى من عدة مغارات متصلة يبلغ طولها الإجمالى حوالى 48كم على الأقل.

يتكون الكهف نتيجة لعملية كيميائية أساسا تتضمن إذابة صخر كربوناتى بالمياه الجوفية المتخللة والغنية بثانى أكسيد الكربون (شكل 17.13) . وكما رأينا عند دراستنا للصخور الرسوبية ، فإن معدل إذابة الحجر الجيرى يزداد نتيجة وجود ثانى أكسيد كربون الغلاف الجوى الذائب فى مياه الأمطار. وقد تلتقط المياه المتسربة فى التربة المزيد من غاز ثانى أكسيد الكربون الناتج من جذور النباتات والبكتريا



شكل (17.13): إذابة الحجر الجيرى ليكون كهوفا .
أ. يتحرك الماء عبر الشقوق وأسطح الطباقية فى الحجر الجيرى ، مذيبا الحجر الجيرى تحت منسوب الماء الجوفى .
ب. يؤدى انخفاض منسوب الماء الجوفى إلى تكون نظام من الكهوف يملؤه الهواء . ويؤدى ترسب الكالسيت إلى تكوين الصواعد والهوابط والأعمدة فوق منسوب الماء الجوفى .
(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

والكائنات العضوية المتواجدة فى التربة . وعندما ينتقل هذا الماء الغنى بثانى أكسيد الكربون لأسفل إلى منسوب الماء الجوفى عبر نطاق عدم التشبع إلى نطاق التشبع ، فإنه يؤدى إلى تكون فجوات نتيجة إذابة المعادن الكربوناتية . ويزيد اتساع تلك الفجوات بذوبان الحجر الجيرى على امتداد الفواصل والكسور لتتكون شبكة من الحجرات والممرات . وتكون هذه الشبكات أكثر ما يكون فى نطاق التشبع ، حيث تكون الكهوف ممتلئة بالماء وتتم الإذابة على جميع الأسطح بما فيها الأرضيات والحوائط والأسقف. وقد قُدّر الزمن الذى يستغرقه تكوّن ممر متصل بالمياه المتخللة البطيئة بحوالى 10000 سنة ، بينما يستغرق زيادة اتساع الممر بالماء المناسب بسرعة فى نظام من الكهوف من 10000 إلى مليون سنة إضافية.

وعلى الرغم من الاعتقاد بأن تكوّن الكهوف يتضمن عموماً الإذابة بواسطة حامض الكربونيك، إلا أن بعض الدراسات تقترح أن بعض الكهوف بما فيها مغارات كارلسباد Carlsbad caverns قد تتكون نتيجة الإذابة بحامض الكبريتيك ؛ حيث افُترض أن السوائل التى تحتوى على كبريتيد الهيدروجين والمستمدة من رواسب غنية بالبترول تصعد على امتداد الفواصل لتقابل وتتفاعل مع الماء المحمل بالأكسيجين لتكون حامض الكبريتيك الذى يذيب الحجر الجيرى.

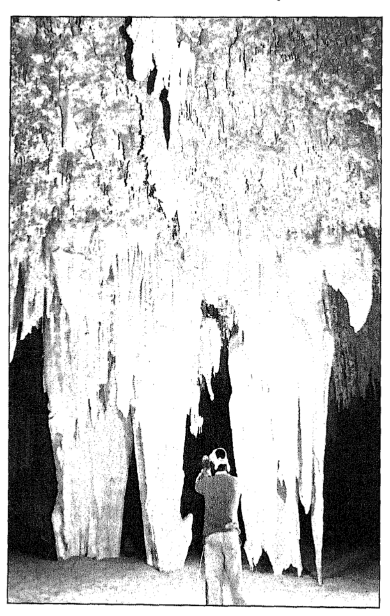
د. رواسب الكهوف

يمكن للجيولوجيين الآن استكشاف الكهوف التى أذيبت يوما ما تحت منسوب الماء الجوفى ، ولكنها توجد الآن فى نطاق عدم التشبع نتيجة انخفاض مستوى الماء الجوفى . ففى هذه الكهوف ، قد تتساقط من السقف قطرات من ماء مشبع بكربونات الكالسيوم. وعندما تتسرب كل نقطة من الماء من سقف الكهف ، فإن بعضا من ثانى أكسيد الكربون الذائب والذى تم التقاطه عند تسرب الماء فى التربة سوف يتبخر ليهرب إلى هواء الكهف . وعندما يحدث هذا ، فإن كربونات الكالسيوم الموجودة فى الماء الجوفى تصبح أقل ذوبانا ، ليترسب من كل نقطة صغيرة كمية ضئيلة من كربونات الكالسيوم على السقف . وتتراكم هذه القطرات الصغيرة على هيئة مخروط أو اسطوانة كربوناتية تسمى هابط **stalactite** تتدلى من سقف الكهف (شكل 18،13) . وعندما تقع بقية النقطة على أرضية الكهف، فإن المزيد من ثانى أكسيد الكربون يهرب وتترسب كمية صغيرة أخرى من كربونات الكالسيوم على

أرضية الكهف أسفل الهابط . وتتجمع هذه الرواسب أيضاً مكونة الصاعد **stalagmite** . وأخيراً، فقد ينمو الصاعد والهابط مع بعضهما ليكونا عموداً واحداً .

هـ. الحفر البالوعية

تعرف الحفرة البالوعية **sinkhole** بأنها منخفض دائرى صغير وعميق فى سطح الأرض فوق صخور كربوناتية بها الكثير من الكهوف (شكل 19.13) . وتقاس الحفر البالوعية بالأمتار أو بعشرات الأمتار ، وهى تشبه القمع فى العادة . وتتكون الحفر البالوعية نتيجه إذابة وانهيار أسقف كهوف الحجر الجيرى ، بينما يتكون بعضها الآخر عند سطح الأرض ، حيث يكون الماء الذائب به ثانى أكسيد كربون حديثًا ومؤثرًا كمذيب للمواد الكربوناتية. ويوجد عديد من الحفر البالوعية عند تقاطع الفواصل حيث يتحرك الماء لأسفل بسرعة أكبر ، وتتكون بذلك حفر بالوعية تشبه القمع.



شكل (**18.13**): الهوابط stalactites والصواعد stalagmites فى كهف الجارة فى الصحراء الغربية المصرية (أ.د. محمود محمد عاشور ، قسم الجغرافيا – جامعة عين شمس) .

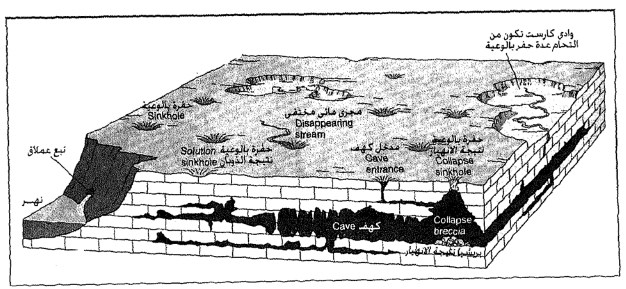
و. طوبوغرافية الكارست

تكثر الكهوف والحفر الوعائية فى المناطق التى تكون الصخور فيها قابلة للذوبان، لدرجة أنها تكون مظاهر طوبوغرافية خاصة بها. وتتميز هذه الطوبوغرافية بوجود أحواض عديدة صغيرة ومتقاربة ونمط صرف ممزق، كما تختفى المجارى المائية فى هذه المناطق لتعود للظهور فى أماكن أخرى على هيئة ينابيع كبيرة. وتسمى المنطقة المميزة بهذه المعالم **بطوبوغرافية الكارست karst topography** نسبة إلى منطقة فى الأجزاء الشمالية من يوغوسلافيا سابقاً، والتى تتميز بطوبوغرافية غير منتظمة من التلال والعديد من الحفر البالوعية (شكل 19.13). وعلى الرغم من أن طوبوغرافية الكارست تميز المناطق الكربوناتية، إلا أن الكارست يمكن أن يتكون أيضاً فى مناطق تتكون من الجبس والملح. وعموماً، فإن الكارست يتكون أكثر ما يكون فى المناطق التى تتميز بثلاث خصائص:

1- مناخ يتميز بوفرة الأمطار وارتفاع درجة الحرارة بدرجة تساعد على الذوبان مع وجود غطاء نباتى كثيف (لتتكون مياه غنية بثانى أكسيد الكربون).
2- متكونات حجر جيرى به عديد من الفواصل.
3- انحدار هيدروليكى مناسب يسمح بانسياب المياه الجوفية خلال الصخور القابلة للذوبان.

VII. الماء الموجود فى أعماق القشرة الأرضية

تكون كل الصخور الموجودة تحت منسوب الماء الجوفى مشبعة بالماء. وكما ذكرنا سابقاً، فإن الجيولوجيين يجدون الماء فى المتكونات المنفذة الموجودة حتى فى أعمق الآبار التى تُحفر للبحث عن البترول، على أعماق تصل إلى حوالى 8 أو 9 كيلومتر من سطح الأرض. ويتحرك الماء عند هذه الأعماق ببطء، ربما بمعدل أقل من سنتيمتر فى العام. ولذلك فإنه يكون هناك متسع من الوقت لإذابة المعادن، حتى تلك الشحيحة الذوبان منها، أثناء تخلل الماء فى الصخور. وتصبح المواد المذابة فى تلك المياه أعلى تركيزاً من المياه



شكل (19.13): تتميز تضاريس الكارست بوجود كهوف تحت سطحية والكثير من الحفر البالوعية sinkholes السطحية. وقد يقطع نهر رئيسى المنطقة، ولكن تختفى الكثير من المجارى المائية الصغيرة فى الحفر البالوعية.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

الموجودة قرب السطح ، مما يجعل المياه الموجودة عند الأعماق الكبيرة غير صالحة للشرب. فعلى سبيل المثال ، فإن المياه الجوفية التى تتخلل طبقات الملح القابلة للذوبان بسرعة تميل لأن تصبح غنية بكلوريد الصوديوم بدرجه كبيرة.

وتوجد صخور القاعدة النارية والمتحولة عند أعماق أكبر تتراوح بين 12 إلى 15 كيلو متر تحت المكونات الرسوبية الموجودة فى الجزء العلوى من القشرة الأرضية. وتقل المسامية والنفاذية بدرجه كبيرة فى صخور القاعدة النارية والمتحولة ، وبالتالى تكون كمية الماء فى تلك الصخور صغيرة للغاية .

أ. المياه الحرمائية

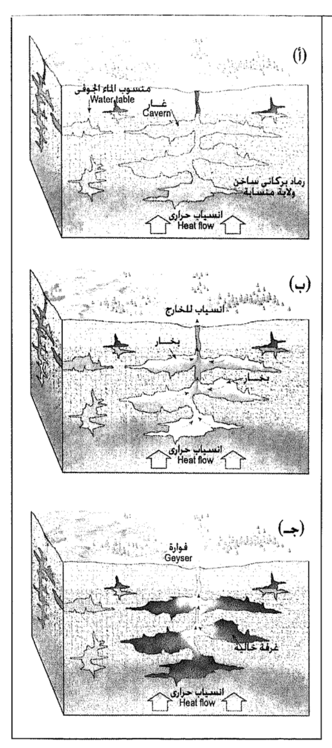
توجد الينابيع الحارة الطبيعية فى يلوستون ناشيونال بارك Yellowstone National Park فى شمال غرب الولايات المتحدة وفى أركانساس وريكجافيك javik Reyk فى أيسلنده ، وفى مناطق أخرى عديدة من العالم. وتهاجر المياه الحرمائية **hydrothermal solutions** (المياه الساخنة فى القشرة الأرضية) فى مثل هذه المناطق بسرعة لأعلى لتنبثق عند سطح الأرض دون أن تفقد الكثير من الحرارة ، وتصل أحيانا إلى درجة حرارة الغليان .

وتتحمل المياه الحرمائية بالمواد الكيميائية التى تُذاب من الصخور عند درجات الحرارة العالية . ويمكن أن تبقى المواد المذابة فى المحلول طالما بقيت المياه ساخنة . ولكن بمجرد أن تصل المياه الحرمائية إلى سطح الأرض فإنها تبرد بسرعة وترسب مختلف المعادن مثل الأوبال (أحد أشكال السيليكا) والكالسيت أو الأراجونيت (أشكال بلورية لكربونات الكالسيوم) . كما تتكون قشرة من كربونات الكالسيوم عند بعض الينابيع الحارة والتى تكون صخر الترافرتين travertine ، وهو صخر جيرى دقيق التبلور أبيض أو كريمى اللون يستخدم أحيانا كصخر مصقول فى أعمال البناء .

وتكون المياه الحرمائية مسئولة عن ترسيب عديد من الخامات الفلزية فى العالم عندما تهاجر هذه المحاليل فى القشرة الأرضية ثم تبرد . والمصدر الأساسى لمعظم المياه الحرمائية فى القارات هو المياه السطحية التى تخللت إلى المناطق العميقة من القشرة الأرضية . وقد تكون بعض المياه الجوية قديمة جدا ، حيث قُدر أن المياه المستمدة من الأمطار والجليد فى هوت سبرنج بولاية أركانساس Hot springs Arkansas قد سقطت منذ أكثر من 400 سنة مضت ، وأنها تسربت ببطء إلى الأرض .

والمصدر الآخر للمياه الحرمائية هو الماء الهارب من الصهارة . ففى مناطق النشاط النارى تتسرب المياه الجوية فى الأرض وتقابل كتلا من الصخور الساخنة لتصبح ساخنة ثم تختلط بالماء المنطلق من الصهارة القريبة ، ثم يعود خليط الماء الحرمائى حينئذ إلى سطح الأرض على هيئة ينابيع حارة **hot springs** أو فوارات (جيزارات) **geysers** . فبينما تنساب الينابيع الحارة باستمرار ، فإن الفوارات (الجيزارات) تخرج منها المياه الساخنة والبخار بصورة متقطعة .

والنظرية التى تشرح الخروج المتقطع للفوارات هى نموذج للاستنتاج الجيولوجى لديناميكية عمل الماء الجوفى الساخن ، والذى يوجد على بعد مئات الأمتار تحت سطح الأرض . ومن المحتمل أن الفوارات تكون متصلة بالسطح بنظام من الكسور غير المنتظمة والمنحنية وبتجاويف وفتحات ، عكس الينابيع الحارة التى تنبثق مباشرة وبنظام أكثر انتظاما إلى السطح . ويوضح شكل (20.13) النظرية التى تشرح الخروج المتقطع للفوارات.



شكل (**20.13**): شكل نموذجى لفوارة (جيزر) **geyser**، والتى تتكون فى غرف تحت سطح الأرض عندما لاتتوزع الحرارة بتيارات الحمل.

أ. فى هذا الشكل، ترتفع درجة حرارة المياه الجوفية الموجودة بالقرب من قاع الغرف إلى درجة تقرب من درجة الغليان، حيث إن درجة الغليان عند قاع الفوارة تكون أعلى منها عند السطح (أكثر من 100 درجةمئوية) لأن وزن الماء يزيد الضغط.

ب. يسخن أيضًا الماء الموجود لأعلى فى نظام الفوارة، ولهذا فهو يتمدد وينساب بعضه للخارج عند سطح الأرض، ويتسبب فقد الماء فى خفض الضغط الموجود على الماء المتبقى فى أسفل

جـ. يحدث الغليان فى منطقة الضغط المنخفض بالقرب من القاع. ويتحول بعض ماء القاع إلى بخار، ويتمدد البخار ويندفع كفوران. وبعد فوران الجيزر يغوص بعض الماء الجوفى البارد فى الغرفة وتبدأ الدورة من جديد.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

وتنشأ بعض الينابيع الحارة الأخرى من الماء الجوى الذى تحرك لأسفل فى مكونات الصخور الرسوبية العميقة، حيث ترتفع درجة حرارته نتيجة ارتفاع درجة الحرارة طبيعيا مع العمق نتيجة ضغط بخار الماء المتجمع، ثم تعود على هيئة مياه حرمائية إلى السطح. وقد نشأ عديد من الخامات الفلزية ورواسب معدنية أخرى فى الصخور الرسوبية بعيدا عن أى نشاط نارى.

كما استخدم الجيولوجيون المياه الحرمائية كمصادر جديدة ونظيفة للطاقة؛ حيث استخدام البخار الناتج عن النشاط الحرمائى فى الينابيع الحارة والفوارات (الجيزارات) فى كل من شمال كاليفورنيا وأيسلندة

وإيطاليا ونيوزيلنده لإدارة التوربينات المولدة للكهرباء. وعلى الرغم من أهمية المياه الحرمائية فى توليد الطاقة وفى احتوائها على الخامات المعدنية وفى الاستشفاء ، إلا أن هذه المياه لا تساهم فى إمدادات المياه السطحية بسبب احتوائها على الكثير من المواد الذائبة . ويلاحظ أن صخور الأوليجوسين بمنطقة الجبل الأحمر والمناطق المحيطة به فى شرق القاهرة تحتوى على الكثير من الفوارات (الجيزارات) المتحجرة .

الملخص

1- تنشأ المياه الجوفية أساسا من ماء المطر ، حيث يتواجد الماء فى كل مكان تحت سطح الأرض . ويتحرك الماء أساسا بالتخلل وبمعدل أبطأ كثيرا من انسياب المياه السطحية فى المجارى المائية فوق سطح الأرض ..

2- منسوب الماء الجوفى هو الحد الأعلى لنطاق التشبع وفى المناطق الرطبة قد يكون قريبا إلى حد كبير من سطح الأرض .

3- فى المناطق الرطبة يكون منسوب الماء الجوفى مطابقا تقريبا لشكل سطح الأرض فوقه ، بينما ينخفض منسوب الماء الجوفى فى الآبار الجافة فى أوقات الجفاف .

4- يحدد منسوب الماء الجوفى السطح العلوى لمكمن ماء غير محصور ، بينما تحد حابسات الماء (طبقات غير منفذة) المكمن المحصور من أعلى ومن أسفل.

5- مكامن المياه الجوفية هى تكوينات صخرية منفذة تحت سطح الأرض تحتوى ماءً صالحا للاستخراج ، وتسمح بسريان الماء بكميات تكفى لإمداد الآبار . وتعتبر طبقات الجرول والحصى والحجر الرملى المنفذة هى أكثر مكامن المياه الجوفية إنتاجا .

6- تقع الينابيع غالبا فى المناطق التى يتقاطع فيها سطح الأرض مع منسوب الماء الجوفى أو حابس للماء (صخر غير منفذ) .

7- يحسب معدل تصريف الماء الجوفى من ناتج مساحة المقطع العرضى لمسار الانسياب ومعامل النفاذية والانحدار الهيدروليكى طبقا لقانون دارسى.

8- إذا كانت قمة البئر التى تخترق مكمن ارتوازى تقع أسفل منسوب الماء الجوفى فى منطقة إعادة الملء فإن الضغط الهيدروستاتيكى يسبب ارتفاع الماء فى البئر وتدفقه طبيعيا عند السطح دون ضخ .

9- ينساب الماء الجوفى فى معظم الآبار مباشرة تحت تأثير الجاذبية الأرضية . ويسبب ضخ الماء من الآبار فى تكون مخاريط انخفاض فى منسوب الماء الجوفى .

10- تتأثر نوعية (جودة) الماء بمحتواه من المواد المذابة طبيعيا وبتداخل ماء البحر وبالملوثات المختلفة الناشئة عن الانسياب والنشاط الصناعى ، والتى تتخلل خزانات المياه الجوفية .

11- تذيب المياه الجوفية المعادن من الصخور ، كما أنها ترسب مواد تعمل كمواد لاحمة بين حبيبات الرواسب ، وتقل بذلك المسامية ويتحول الراسب إلى صخر رسوبى .كما تتكون الكهوف والحفر البالوعية نتيجة إذابة المياه الجوفية للصخور الكربوناتية ، كما تترسب كربونات الكالسيوم على هيئة صواعد وهوابط . وتنشأ

طوبوغرافية الكارست فى مناطق الكربونات المسامية أو الصخور الأخرى سهلة الذوبان ، والتى تتميز بتواجد الكهوف والحفر البالوعية مع اختفاء المجارى المائية .

12 - يجب تخزين النفايات الخطرة (السامة والمشعة) تحت سطح الأرض بشرط أن تكون الظروف الجيولوجية تسمح بعدم تغير أنظمة المياه الجوفية على امتداد فترات زمنية جيولوجية طويلة .

13- يؤدى ارتفاع حرارة المياه الجوفية المتخللة فى أجسام الصهارة داخل القشرة الأرضية إلى تحرك وانتقال المياه الحرمائية لتخرج إلى سطح الأرض على هيئة فوارات (جيزارات) وينابيع حارة . وتكون الصخور عند الأعماق الكبيرة فى القشرةالأرضية (أكثر من 12-15 كم) عالية الكثافة ومنخفضة المسامية ، ولذلك تحتوى على كميات ضئيلة للغاية من الماء .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://water.usgs.gov/
http://www.thehydrogeologist.com/index.htm
http://ghrc.msfc.nasa.gov/
http://www.epa.gov/ow/

المصطلحات المهمة

English	العربية
aquiclude	حابس الماء (طبقة كتيمة)
aquifer	مكمن ماء جوفي
artesian aquifer	مكمن ارتوازي
artesian flow	انسياب ارتوازي
compactness	كبس (دمج)
cone of depression	مخروط الانخفاض
confined aquifer	مكمن ماء محصور
Darcy's law	قانون دارسي
discharge	تصريف
dripstone	حجر التنقيط = stalactite
effluent stream	مجرى مائي متأثر
geyser	فوارة (جيزر)
groundwater	ماء جوفي
groundwater table	منسوب الماء الجوفي
hot spring	ينبوع حار
hydraulic gradient	تدرج هيدروليكي
influent stream	مجرى مائي مؤثر (نهر مغذٍ)
karst topography	طوبوغرافية الكارست
meteoric water	ماء جوي
perched groundwater	ماء جوفي جاثم
perched water table	منسوب ماء جاثم
percolation	تخلل
permeability	نفاذية
porosity	مسامية
recharge	إعادة الملء
recharge area	منطقة إعادة الملء
replacement	إحلال
saturated zone	نطاق التشبع
sinkhole	حفرة بالوعية
spring	ينبوع
stalactite	هابط (ج.هوابط)
stalagmite	صاعد (ج.صواعد)
unconfined aquifer	مكمن ماء غير محصور
unsaturated zone	نطاق غير مشبع
water table	منسوب الماء الجوفي
well	بئر
zone of aeration	نطاق التهوية
zone of saturation	نطاق التشبع

الأسئلة

1. ما المصدر الأساسى للمياه الجوفية ؟
2. ما الفرق بين نطاقات الماء الجوفى المشبعة وغير المشبعة ؟
3. لماذا يبقى النطاق الرقيق الموجود فوق منسوب الماء الأرضى مباشرة فى حالة رطبة باستمرار؟
4. لماذا تميل ممرات انسياب المياه الجوفية المتحركة تحت التل للتحرك لأعلى ناحية المجرى المائى فى واد مجاور ؟
5. ما المتغيرات التى تحدد الزمن الذى يستغرقه الماء للتحرك من منطقة إعادة الملء إلى منطقة التصريف ؟
6. اذكر ما الانحدار الهيدروليكى وما أهميته فى تحديد معدل انسياب الماء الجوفى.
7. ما مكمن الماء الجوفى ؟ ولماذا يكون الحجر الرملى مكمنا أرضيا أفضل من الطفل أو حجر الصلصال ؟
8. ما الخصائص الموجودة فى الصخور النارية والمتحولة والتى تسمح بانسياب المياه الجوفية فيها ؟
9. ما علاقة الينابيع بمستوى الماء الجوفى؟ اذكر الفرق بين الينابيع الحارة والفوارات (الجيزارات) ؟
10. ما أسباب تكون مخروط انخفاض حول بئر منتج ؟
11. ما الأسباب التى تجعل الماء يرتفع إلى سطح الأرض أو فوقها فى البئر الارتوازية؟
12. لماذا يكون الرمل مؤثرا بدرجة خاصة فى تنقية المياه المنسابة خلاله ؟
13. لماذا لا تتكون الصواعد والهوابط فى كهف موجود فى نطاق التشبع ويكون بالتالى مملوءًا بالكامل بالماء ؟
14. لماذا لا تتكون طوبوغرافية الكارست بصورة ملحوظة فى الحجر الجيرى فى المناطق الشديدة البرودة ؟
15. اقترحت منطقة كبيرة على جانب تل لاستخدامها كمردم برى للنفايات المتخلفة عن مدينة صغيرة قريبة ، واسُتشرت لعمل تقييم جيولوجى للموقع فى مدى تأثر مصادر الماء الجوفى المحلية بهذه النفايات . ما العوامل الجيولوجية التى سيتم وضعها فى الاعتبار عند الفحص ، ولماذا ؟
16. إذا كنت تعيش بالقرب من الشاطئ ، وبدأت تلاحظ أن هناك طعما مالحا خفيفا فى ماء البئر ، كيف يمكنك أن تشرح التغير فى نوعية الماء ؟

الفصل 14

المثالج : عمل الجليد

I. تحول الثلج إلى جليد المثلجة: الجليد باعتباره صخرا

أ. أنواع المثالج

1. المثالج الجبلية والقلنسوات الجليدية

2. المثالج القارية والرفوف الجليدية

ب. كيفية تكون المثالج

جـ. نمو المثالج: التراكم

د. انكماش المثالج : النفاد

هـ. تغيير حجم المثالج : العلاقة بين التراكم والنفاد

و. المثالج : مصادر متحركة للماء فى المناطق الفقيرة به

II. حركة المثالج

أ. ميكانيكية الانسياب الجليدى

III. التثلج ومعالم الأرض الجليدية

أ. التجويه الجليدية ومعالم التعرية

1. معالج التجوية الجليدية الصغيرة

2. المعالم الأرضية للجبال المتثلجة

3. المعالم الجليدية الناشئة عن المثالج القارية والقلنسوات الجليدية

ب. نقل الرواسب بالمثالج

ج. الرواسب الجليدية

1. الرواسب المتكونة بالجليد

2. الرواسب المتكونة بالماء : المنجرفات المتطبقة

3. تربة الصقيع الدائم

IV. العصور الجليدية : تثلج البليستوسين

أ. مثالج العصر الجليدى

ب. تحولات المجارى المائية والبحيرات الجليدية

ج. انخفاض مستوى سطح البحر

د. تشوه القشرة الأرضية

هـ. التثلجات المبكرة

1. الدليل من قاع البحر
2. التثلجات قبل حين البليستوسين

V. أسباب حدوث العصور الجليدية

أ. العصور الجليدية وتغير وضع القارات

ب. العصور الجليدية والنظرية الفلكية

جـ. تركيب الغلاف الجوى

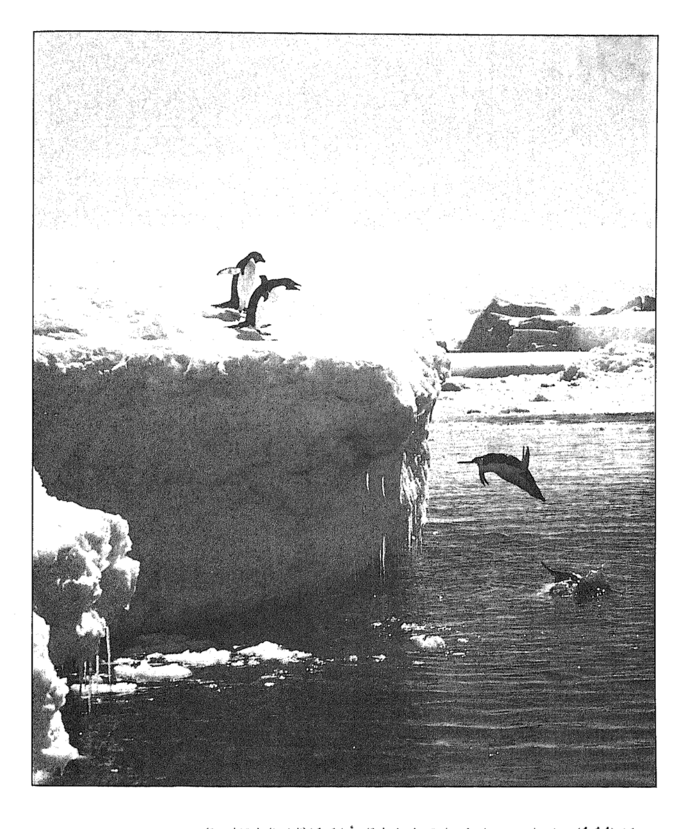
د. التغيرات فى دوران المحيطات

تُظهر صورة الأرض من الفضاء حجم الماء الذى يغطى كوكب الأرض ، كما تُظهر صور الأقمار الصناعية للمناطق القطبية وسلاسل الجبال ذات القمم البيضاء أن الكثير من ماء الأرض متجمد . فعندما يتساقط الثلج snow فوق سطح الأرض فى فصول الشتاء المتعاقبة ، وبمعدل أكبر من معدل انصهار الثلج فى فصول الصيف التالية ، فإن الثلج يبدأ فى التراكم تدريجياً. ويتزايد وزن الثلج بتراكم المزيد منه فوق الطبقات التى تسفله ، مما يؤدى إلى إعادة تبلور الثلج وتكون كتلة صلبة من الجليد ice . وتشبه تلك العملية تحول الصخور الرسوبية إلى صخور متحولة نتيجة إعادة التبلور تحت ضغط الرواسب المتراكمة . وعندما يزيد سمك الثلج والجليد المتراكمان تعمل قوة الجاذبية الأرضية على تحرك الكتلة المتجمدة وتنشأ مثلجة (شكل 1.14) . ويمكن تعريف المثلجة **glacier** بأنها جسم ضخم دائم من الجليد على سطح الأرض ، يتكون أساسا من الثلج المتبلور ، والذى تشير الدلائل إلى أنه يتحرك حاليا أو تحرك يوما ما فى اتجاه المنحدرات أو لخارج مركز المثلجة نتيجة للجاذبية الأرضية.

وتغطى المثالج المناطق التى يكون متوسط درجة الحرارة فيها منخفضا لدرجة أن الماء يبقى متجمدا طول العام . وتوجد معظم المثالج عند خطوط العرض العليا بالقرب من القطبين، وهى أبرد أجزاء كوكب الأرض . كما توجد بعض المثالج الصغيرة عند خطوط العرض المتوسطة والمنخفضة على قمم الجبال العالية ، حيث توجد درجات الحرارة المنخفضة أيضا .

والجليد هو العامل الجيولوجى المهم فى تشكيل سطح الأرض فى مناطق الأرض المتجمدة ، ويغطى جليد المثالج حوالى 10٪ من سطح الكرة الأرضية . ويتحرك الكثير من هذا الجليد ببطء واستمرار من مراكز مسطحات جليد شاسعة إلى حوافها . كما ينحدر الجليد ببطء أيضا من قمم الجبال ، وينصهر خلال فترة زمنية قصيرة عند حواف المثالج ، ولكن بمعدل تقدمه نفسه ، ولذلك تبقى مساحة الجليد الكلية ثابتة تقريبا .

ويتسبب المناخ البارد فى اتساع المثالج على المدى الزمنى الطويل ، حين يزيد معدل تراكم الجليد عن معدل انصهاره . وقد غطى الجليد منذ حوالى عشرين ألف سنة مضت ثلاثة أضعاف المساحة المغطاة به الآن . ومن المحتمل أن الجليد قد انكمش بدرجة ملحوظة على الأرض خلال القرون القليلة الماضية ، حيث كان معدل انصهار الجليد نتيجة ارتفاع درجة حرارة الأرض أسرع من معدل تراكمه وتحركه . ومن المؤكد أيضا أن تأثير انصهار الجليد على الأرض يكون ضخماً ، حيث يؤدى هذا الانصهار إلى ارتفاع مستوى سطح البحر ليغطى المدن الساحلية منخفضة الارتفاع ، بالإضافة إلى هجرة نطاقات المناخ ، حيث تتغير نطاقات المناخ المعتدل إلى نطاقات شبه قاحلة . ومن المؤكد أن معرفة المناطق الجليدية هو موضوع تطبيقى ومهم فى فهم البيئة .



شكل (**1.14**): جبل جليدى iceberg ومثلجة glacier في قارة أنتاركتيكا (القارة القطبية الجنوبية).

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

وتقوم المثالج بتعرية الوديان ذات الجوانب شديدة الانحدار وكشط أسطح صخور الأساس واقتلاع كتل ضخمة من الأرض الصخرية أسفلها. وخلال العصور الجليدية ice ages الحديثة استطاعت المثالج تعرية سطح الأرض بمعدل أكبر بكثير مما فعلت الأنهار والرياح خلال هذا الزمن الجيولوجى القصير نسبياً. ويبلغ ركام التجوية الجليدية حجما هائلا ، حيث ينقل الجليد أطناناً هائلة من الرواسب إلى حافة المثلجة ، أو لترسب بعيدا بواسطة مجارى الماء المنصهر . وتؤثر التعرية الجليدية والترسيب على الأرض من النواحى التالية:

1. تصريف الماء وحمولة الرواسب فى الأنهار الرئيسية.
2. كمية الراسب المنقولة إلى المحيطات .
3. التعرية والترسيب فى المناطق الساحلية وعلى الرفوف القارية الضحلة نتيجة التغير فى مستوى سطح البحر .

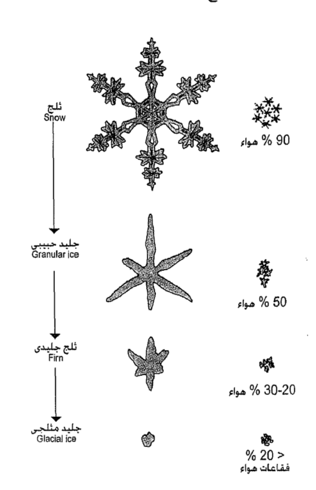
وقد نحتت المثالج الكثير من معالم الأرض فى أحزمة الجبال ، كما شكلت فى البليستوسين معالم مناطق شاسعة من أراضٍ قارية منخفضة امتدت بعيدا فيما نعتبره الآن مناطق معتدلة . وعند انصهار تلك المثالج فإنها خلفت وراءها رواسب وأشكال تعرية تدل على سابق وجودها .

وتدل الرواسب الجليدية وأشكال التعرية الجليدية على المناخات القديمة والحديثة ، لأن الثلج والبرودة المستمرة ضروريان لتكون المثالج . ويدل الانتشار الواسع للمثالج فى الماضى القريب على أن مناخ الأرض كان أبرد كثيراً مما هو عليه الآن فى مناطق كثيرة . ومن المعروف الآن أن المثالج غطت فى الأزمنة الجيولوجية القديمة مناطق تعتبر الآن أدغالا قارية ، بينما هناك أجزاء من الكرة الأرضية مغطاة حاليا بالجليد ، إلا أنها كانت دافئة ورطبة فقط ولم يكن بها قلنسوات جليدية قطبية فى الماضى . ويستخدم التوزيع السابق للمثالج فى تحديد نوع المناخ فى الماضى ، وأيضا فى التنبؤ بالتغيرات المستقبلة فى المناخ أيضا.

وسنستعرض فى هذا الفصل أنواع المثالج وكيفية تكونها وطرق تحركها . كما سنستعرض أيضا التجوية الجليدية ومعالم التعرية ، وكذلك تأثير المثالج أثناء نقل وترسيب حمولتها من الرواسب ، تاركة وراءها عديدًا من المعالم على سطح الأرض نتيجة حركة وتقدم المثالج وتراجعها . كما سنستعرض العصور الجليدية وأسباب حدوثها .

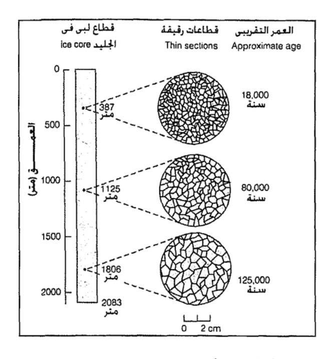
ا. تحول الثلج إلى جليد المثلجة: الجليد باعتباره صخرا

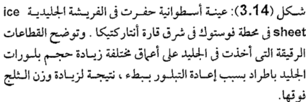
يعتبر جليد المثلجة صخرا متحولا ، يتكون من بلورات متداخلة من **معدن الجليد ice** . وتعتمد خصائص الجليد على عوامل التشوه تحت الضغط الناشىء عن تراكم الثلج والجليد الذى يعلوه . وحيث أن الثلج **snow** المتساقط حديثاً يكون عالى المسامية ، كما تكون كثافته أقل من عُشر كثافة الماء العادى ، فإن الهواء يتخلل المسام بين بلورات الثلج بسهولة ، حيث تختفى تدريجيا نقاط الضعف الموجودة فى رقائق الثلج بالبخر . ويتكثف بخار الماء الناتج ، خاصة فى الأماكن القريبة من مراكز رقائق الثلج ، وتصبح بلورات الجليد الهشة والمتحولة ببطء أصغر حجما ، وأكثر استدارة وكثافة كما تختفى المسام بينها وتضمحل فقاعات الهواء بداخلها (شكل 2.14).



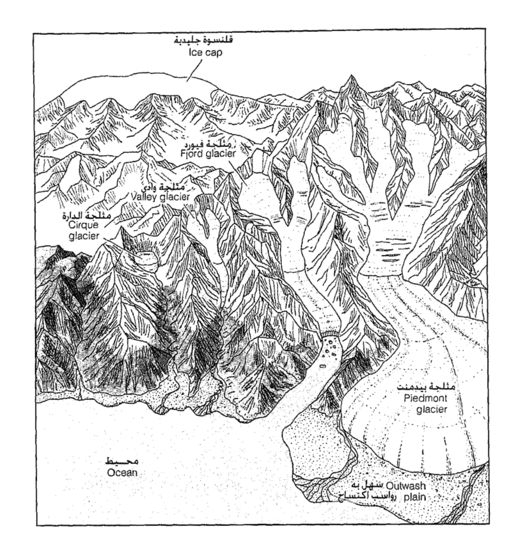
شكل (**2.14**): مراحل تحول بلورات الثلج إلى جليد حبيبى ثم إلى ثلج جليدى وأخيرا إلى جليد مثلجى . ويصاحب هذا التحول زيادة فى الكثافة ، حيث يقل الهواء فى البلورات وتختفى المسام بينها ، كما تختفى النقاط الدقيقة لرقائق الثلج نتيجة الانصهار والتبخر .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويؤدى التراكم إلى تزايد كثافة الثلج عاما بعد عام إلى أن يصبح فى النهاية غير منفذ للهواء ، ويصبح جليد مثلجة . وعلى الرغم من أن الجليد يصبح صخرا، إلا أن هذا الجليد يكون له درجة انصهار أقل بكثير من درجة انصهار أى صخر آخر يتواجد فى الطبيعة ، وتكون كثافته فى حدود 0.9 جم / سم^3 ، مما يعنى أنه سيطفو فوق سطح الماء .




شكل (**3.14**): عينة أسطوانية حفرت فى الفريشة الجليدية ice sheet فى محطة فوستوك فى شرق قارة أنتاركتيكا . وتوضح القطاعات الرقيقة التى أخذت فى الجليد على أعماق مختلفة زيادة حجم بلورات الجليد باطراد بسبب إعادة التبلور ببطء ، نتيجة لزيادة وزن الثلج فوقها.
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتحدث المزيد من التغيرات فى الجليد كلما زاد عمق المثلجة . ويوضح شكل(3.14) عينة أسطوانية حصل عليها العلماء الروس عندما حفروا تحت قاعدة مثلجة فى مركز فوستوك Vostok Station فى شرق قارة أنتاركتيكا (شكل 4.14) . حيث لاحظوا أن زيادة سمك المثلجة بإضافة المزيد من الثلج المتساقط يعمل على زيادة الضغط ، الذى يؤدى إلى نمو حبيبات الجليد الصغيرة وزيادة حجمها حتى يصل قطرها بالقرب من قاعدة المثلجة إلى 1 سم أو أكثر . وتشبه الزيادة فى حجم الحبيبات نتيجة زيادة الضغط ما يحدث عندما يتحرك صخر دقيق الحبيبات إلى الأعماق داخل قشرة الأرض ليتعرض لضغط عال لمدة طويلة ، حيث تتكون ببطء حبيبات كبيرة من المعادن المختلفة (انظر فصل الصخور المتحولة) .



شكل (**4.14**): الأنواع الشائعة من مثالج الجبال مصنفة حسب الشكل والحجم .

توجد مثلجة دارة **cirque glacier** صغيرة فى حفرة عميقة مستديرة عند قمة الوادى بينما تندمج دارتان جليديتان معا فى الوادى المجاور وتكون مثلجة الوادى **valley glacier** ، كما تكونت مثلجة فيورد **fjord glacier** فى واد مجاور ، حيث انفصلت جبال جليدية **icebergs** فى فيورد طويل ، وتتكون مثلجة بيدمنت **piedmont glacier** عندما تلتقى عدة روافد جليدية فى مجرى جليدى واحد ينتهى بفريشة جليدية واسعة . ونلاحظ فى أعلى الجبل وجود قلنسوة جليدية **ice cap** على شكل قبة تغطى هضبة فى المنطقة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

أ. أنواع المثالج

تقسم المثالج بناءً على الحجم والشكل إلى قسمين رئيسيين هما المثالج الجبلية والقلنسوات الجليدية والثانى هو المثالج القارية والرفوف القارية . كما تصنف المثالج أيضا بناءا على درجة حرارتها الداخلية . ويوضح جدول (1.14) أنواع المثالج الرئيسية . ونعرض فيما يلى وصفا لتلك الأنواع .

جدول (1.14) الأنواع الرئيسية للمثالج مصنفة طبقاً لشكلها

نوع المثلجة	الوصف
مثلجة الوادى Valley glacier	تنساب وتنتشر من جانب الوادى على امتداد وفوق قاع الوادى
مثلجة بيدمنت Piedmont glacier	فص عريض من الجليد يشبه الملعقة المقلوبة ، يمتد فوق منحدرات لطيفة واسعة (بيدمنت) إلى ما بعد مقدمة الجبل ، حيث تمده بالجليد مثلجة وادى كبيرة أو أكثر .
مثلجة الدارة Cirque glacier	توجد فى حفرة دائرية عميقة على جانب من الجبل
مثلجة فيورد Fjord glacier	مثلجة وادى توجد فى فيورد ، حيث يكون قاع الفيورد أسفل مستوى منسوب البحر .
قلنسوة جليدية Ice cap	جسم من الجليد والثلج على شكل قبة ، يغطى الأراضى المرتفعة من الجبال (أو الأراضى الأقل ارتفاعا ولكن عند خطوط عرض عالية) . وتظهر القلنسوة الجليدية انسيابا إشعاعيا للخارج.
مثلجة قارية Continental glacier	كتلة من الجليد فى حجم القارة تغطى الأرض وتكون سميكة ، وتعرف أحيانا بالفريشة الجليدية ice sheet .
رف قارى Ice shelf	مثلجة سميكة على هيئة لوح تطفو فوق البحر ويتم تغذيتها بواحدة أو أكثر من المثالج فوق سطح اليابس ، توجد عادة فى الخلجان الكبيرة.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

1. مثالج الوادى

تكون مثالج الوادى **valley glacier** مألوفة لدى المتزجين على الجليد ومتسلقى الجبال ، ويطلق عليها أحيانا المثالج الألبية alpine glaciers. وتتكون تلك المثالج من أنهار من الجليد تجرى من المرتفعات الموجودة بالمناطق الباردة ، حيث يتراكم الثلج غالبا عند تلك المرتفعات ، فى أودية موجودة سلفا وينساب بين حوائط الوادى (شكل 4.14). وتشغل معظم هذه المثالج عرض الوادى بأكمله ، وقد يصل سمك الجليد فيها مئات الأمتار. وعند خطوط العرض المنخفضة يكون المناخ أكثر دفئا ، لذا توجد مثالج الوادى عند رؤوس الأودية فقط ، فى قمم الجبال ، أما عند خطوط العرض العليا حيث تكون المناخات أكثر برودة ، فإن المثالج الجبلية تهبط على امتداد الوادى لمسافة يبلغ طولها عدة كيلومترات . كما قد تمتد على هيئة فصوص عريضة فى الأراضى المنخفضة المتاخمة لسفوح الجبال . وعندما تنحدر مثالج الوادى على سلاسل جبلية شاطئية فإنها قد تنتهى عند حافة المحيط حيث تتكسر كتل من الجليد وتكون جبال الجليد **icebergs** . وقد تمتد مثلجة جبلية كبيرة جدا للخارج على بيدمنت (سفح جبل) لطيف الانحدار وإلى ما بعد قاعدة الجبل ، وتعرف تلك المثلجة بمثلجة بيدمنت **piedmont glacier** ، وتتكون من فص كبير وعريض من الجليد يشبه الملعقة المقلوبة (شكل 4.14) . ويؤدى اقتلاع وتمزق الصخور عند قمة مثلجة الوادى بفعل الجليد إلى نحت حفرة مستديرة عميقة تنحدر جوانبها برفق ، تعرف بدارة الجليد **cirque** ، وهى تشبه السلطانية ، أو تشبه نصف فنجان شاى قُطع رأسيا (شكل 4.14).

الفيوردات: وقد تقوم مثالج الوادى عند الشواطئ، وعلى عكس الأنهار أو المجارى المائية عموماً ، بتعرية قيعان الوادى إلى مستوى أعمق بكثير من مستوى سطح البحر . وعندما يتراجع الجليد ، فإن هذه الأودية

ذات الحوائط شديدة الانحدار والتى ما تزال تحتفظ ببروفيل على شكل حرف U تغمرها مياه البحر ، تسمى بالفيوردات **fjords** . وتسمى المثلجة التى تنشأ داخل الفيورد بمثلجة الفيورد fjord glacial ، شكل (4.14). وتنشأ عن هذه الفيوردات مناظر مدهشة تميز شواطئ ألاسكا وكولومبيا البريطانية والنرويج ، وتعتبر مناطق مناسبة لرسو السفن وإنشاء الموانى .

وتتكون القلنسوة الجليدية **ice cap** من جسم من الجليد والثلج على شكل قبة تُظهر انسيابا شعاعيا للخارج ، وتغطى مناطق جبلية مرتفعة أو أرضًا منخفضة بالقرب من المناطق القطبية عند خطوط العرض العليا (شكل 4.14) .

2. المثالج القارية والرفوف الجليدية

المثلجة القارية**continental glacier** هى أكبر أنواع المثالج على سطح الأرض. والمثلجة القارية عبارة عن فريشة سميكة من الجليد تتحرك حركة بطيئة للغاية (لذلك تسمى أحيانا فريشة جليدية ice sheet) . وأكبر الفرش الجليدية فى العالم اليوم هى تلك التى تغطى معظم جرينلاند وقارة أنتاركتيكا (وهى قارة غير مأهولة تقع حول القطب الجنوبى) . ويغطى جليد المثالج فى جرينلاند وأنتاركتيكا المنطقة بالكامل وليس وديان الجبال فقط .

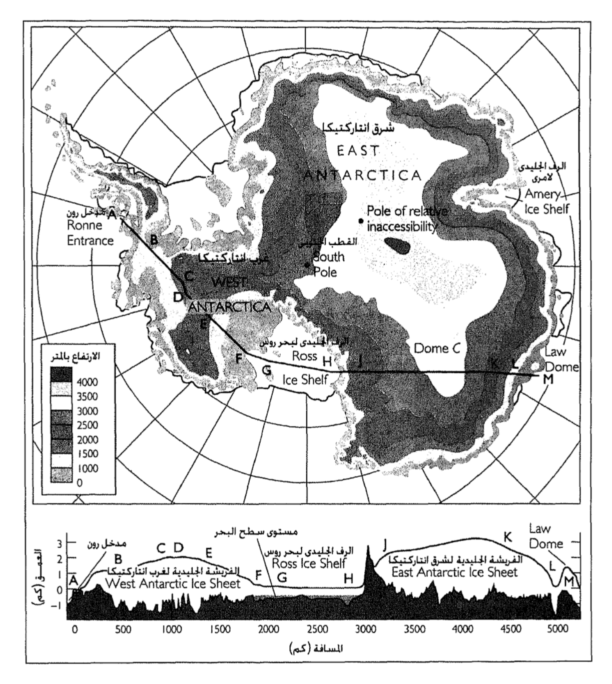
ويغطى الجليد حوالى 80 ٪ من المساحة الكلية لجزيرة جرينلاند التى تبلغ حوالى 4.5 مليون كيلو متر مربع ، يغطيها حوالى 2.8 مليون كيلو متر مكعب من الجليد ، تمثل حوالى 11 ٪ من جليد العالم . ويشبه السطح العلوى لفريشة الجليد عدسة محدبة ضخمة . ويبلغ سمك الجليد فى أعلى نقطة فى منتصف الجزيرة أكثر من 3200 متر. وينحدر سطح الجليد من المنطقة المركزية تجاه البحر من كل الجهات. وتتكسر فريشة الجليد عند الشاطئ الذى تحيطه الجبال إلى ألسنة ضيقة تشبه مثالج الوادى ، وتنحدر عبر الجبال حتى تصل إلى البحر. ويتكسر الجليد عند البحر ليكوّن جبال الجليد التى تطفو فى البحر بحُريّة .

ويغطى قارة أنتاركتيكا فريشتان جليديتان كبيرتان تتقابلان على امتداد سلسلة جبال شاهقة الارتفاع تعرف بجبال ترانس أنتاركتيك Transantarctic Mountains . وتضم قارة أنتاركتيكا حوالى 84 ٪ من جليد العالم ، ويبلغ حجم الجليد بها حوالى 24 مليون كم^3 . وتغطى الفريشة الجليدية الأكبر قارة أنتاركتيكا ، بينما تغطى الفريشة الأصغر عدة جزر تقع فى غرب القارة ، ويطلق عليها أرخبيل أنتاركتيكا Antarctic archipelago. وبسبب الفريشة الجليدية فإن قارة أنتاركتيكا يكون بها أعلى متوسط ارتفاع فوق سطح الأرض وأقل متوسط درجة حرارة بالنسبة لكل القارات (شكل 5.14) .

والرف الجليدى **ice shelf** هو غطاء سميك من الجليد مُستوٍى تقريباً يطفو فوق سطح المحيط وتتم تغذيته بواحدة أو أكثر من المثالج فوق سطح اليابسة . وينتهى من ناحية البحر بجرف جليدى حاد قد يرتفع إلى حوالى 50 مترا . وتوجد الرفوف الجليدية عند عدة أماكن على امتداد حواف فرش أنتاركتيكا الجليدية . فمثلا يطفو فوق بحر روس Ross Sea رف جليدى يبلغ مساحة ولاية تكساس بالولايات المتحدة الأمريكية (شكل 5.14) .

المثالج معتدلة الحرارة والمثالج القطبية

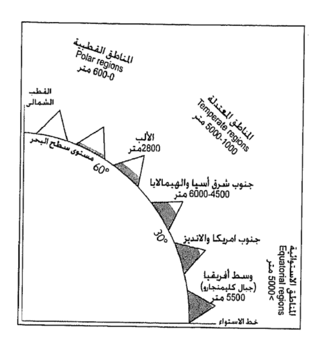
تصنف المثالج ليس فقط تبعاً للحجم والشكل ، ولكن أيضا تبعا لدرجة حرارتها الداخلية إلى مثالج معتدلة الحرارة ومثالج قطبية . فدرجة الحرارة مقياس مهم فى التصنيف ، لأنها تساعد فى تحديد كيفية تحرك المثالج وكيف تساهم فى تشكيل سطح الأرض .



شكل (**5.14**): خريطة كنتورية ومقطع عرضي في قارة أنتاركتيكا، توضح طوبوغرافية الفريشتين الجليديتين القاريتين اللتان تغطيان القارة القطبية الجنوبية كلها واليابسة تحتها، كما توضح الخريطة الرفوف القارية (غير مهشرة).

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ويكون الجليد في المثلجة معتدلة الحرارة **temperate glacier** (تسمى أيضا مثلجة دافئة warm glacier) عند نقطة الانصهار الضغطي **pressure melting point**، وهي درجة الحرارة التي ينصهر عندها الجليد عند ضغط معين. ويوجد الماء الناتج من عملية الانصهار مع الثلج في حالة اتزان في هذه المثالج التي تتواجد أساسا عند خطوط العرض المنخفضة والمتوسطة (حول خط الاستواء).



شكل (**6.14**): يتغير ارتفاع خط الثلج **snow line** ، وهو الارتفاع الذى لاينصهر تماما مايسقط فوقه من ثلج فى فصل الصيف . ويتغير هذا الارتفاع مع خط العرض ، حيث يكون عند مستوى سطح البحر أو بالقرب منه فى المناطق القطبية ، بينما يصل إلى ارتفاع أكثر من **5500** متر عند خط الاستواء .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وعند خطوط العرض العليا والارتفاعات العالية ، حيث يكون المتوسط السنوى لدرجات حرارة الهواء تحت درجة التجمد ، فإن درجة حرارة المثلجة تبقى تحت نقطة الانصهار الضغطى حيث لا يحدث أى انصهار موسمى ، أو يحدث بدرجة محدودة . وتسمى المثلجة التى يبقى فيها الجليد تحت نقطة الانصهار الضغطى بالمثلجة القطبية **polar glacier**.

ب ـ كيفية تكوّن المثالج

يبدأ تكوّن المثلجة عندما يتساقط الثلج بغزارة فى فصل الشتاء ، ولا ينصهر فى فصل الصيف . ويتحول الثلج تدريجياً إلى جليد ، وعندما يزيد سمك الجليد بدرجة كبيرة ، فإنه يبدأ فى التحرك . ويتطلب تكوّن المثلجة تحقق الشروط التالية :

1- درجات حرارة منخفضة: يلزم لتكوّن المثلجة أن تكون درجة الحرارة منخفضة بدرجة تكفى لأن يبقى الثلج مغطيا لسطح الأرض طول العام ، وتوجد هذه الظروف عند خطوط العرض العليا (المناطق القطبية وتحت القطبية) والمرتفعات العالية (الجبال).ويرجع السبب فى ذلك إلى أن هذه المناطق تكون شديدة البرودة لأن الزاوية بين أشعة الشمس وسطح الأرض تزداد كلما اقتربنا من القطبين ، بمعنى زيادة زاوية سقوط الأشعة على سطح الأرض ، فكلما زادت هذه الزاوية قلت كمية الطاقة الإشعاعية للشمس التى تستقبلها المنطقة . أما المرتفعات العالية فتكون باردة لأن العشر كيلومترات السفلى من الغلاف الجوى تزداد برودتها بانتظام كلما ازداد الارتفاع فوق سطح الأرض . ونتيجة لذلك يتغير ارتفاع خط الثلج من موضع لآخر . ويعرف **خط الثلج snow line** بأنه الارتفاع الذى لا ينصهر ما يسقط فوقه من ثلج فى فصل الصيف ، أى الحد السفلى لثلج دائم طول العام . وتتكون المثالج حتى فى المناخات الدافئة إذا كانت الجبال مرتفعة بدرجة كافية . وتتكون المثالج بالقرب من خط الاستواء على قمم الجبال التى يزيد ارتفاعها عن حوالى 5500م . ويقل هذا الحد الأدنى من الارتفاع بانتظام ناحية القطبين ، حيث يبقى الثلج والجليد طوال العام حتى عند مستوى سطح البحر (شكل 6.14).

2 - كميات كافية من الثلج: يتطلب تكون الثلج والمثالج بالإضافة إلى البرودة الشديدة ، وجود بخار ماء كثيف فى الهواء الجوى . وحيث إن معظم الرياح المحملة ببخار الماء تسقط معظم حمولتها من

الثلج على الجانب المواجه للريح من سلسلة الجبال العالية ، فإن الجانب المدابر للريح يكون جافا ولا يتساقط عليه الثلج . فجبال الأنديز العالية تقع فى حزام تهب عليه رياح من الغرب . ولذلك تتكون المثالج على المنحدرات الغربية الرطبة ، بينما يكون الجانب الشرقى جافا ، ويوجد عليه القليل من الثلج والجليد .

جـ. نمو المثالج: التراكم

يشبه الثلج المتساقط حديثاً كتلة من الزغب أو القطن المندوف تتكون من رقائق الثلج snow flakes. ومع تقدم عمر بلورات الثلج الدقيقة تأخذ فى الانكماش ، وتصبح متساوية الأبعاد (شكل 2.14) . وتتضاغط دقائق الثلج أثناء هذا التحول وتكون ثلجًا حبيبيًّا أكثر كثافة . وعندما يتساقط ثلج جديد فإنه يدفن الثلج الأقدم تحته ، ويتضاغط هذا الثلج الحبيبى إلى شكل متساوى الأبعاد وأكثر كثافة يسمى **ثلجًا جليديًّا firn** ، وهو مرحلة انتقالية بين الثلجsnow والجليدice . وتؤدى زيادة عمر الثلج ودفنه إلى تكوين جليد مثلجة صلب ، بسبب إعادة تبلور الحبيبات الأصغر مما يؤدى إلى تلاحم كل الحبيبات مع بعضها البعض. ويمكن اعتبار الثلج راسب يتحول بالدفن إلى صخر متحول هو الجليد . وتستغرق عملية التحول هذه عدة سنوات فقط ، وقد تستغرق من10 إلى 20 سنة .

وتنمو المثلجة ببطء فى فصل الشتاء ، نتيجة تساقط الثلج على سطح المثلجة وتحوله إلى جليد. وتسمى كمية الثلج التى تضاف إلى المثلجة سنويا بالتراكم **accumulation**. وأثناء تراكم جليد المثلجة ، فإنه يحتفظ ببقايا حياة قديمة ؛ حيث أعلن علماء من إيطاليا والنمسا عام 1992م عن اكتشاف جثمان لإنسان ما قبل التاريخ محفوظاً فى ثلوج جبال الألب على الحدود بين الدولتين . كما وجدت فى شمال سيبريا حيوانات منقرضة متجمدة ومحفوظة بالجليد القديم مثل الماموث، وهو حيوان ضخم يشبه الفيل نشأ قبل التاريخ وانتشر فى المناطق الجليدية . كما وجد أيضا فى جليد المثالج أدلة مهمة على مناخ الأرض ، فقد أوضحت التحاليل الكيميائية لفقاعات الهواء فى الجليد القديم جدا والمدفون فى الأعماق فى كل من جرينلاند وأنتاركتيكا ، أن مستويات ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى كانت أقل خلال التثلج الأخير عنها فى أثناء تراجع الجليد .

د. انكماش المثالج: النفاد

يكتمل نمو المثلجة عندما يتراكم الجليد بسمك كاف ويبدأ فى التحرك . وينساب الجليد مثل الماء على المنحدرات تحت تأثير الجاذبية الأرضية . فقد يتحرك الجليد لأسفل على امتداد واد فى الجبل أو من مركز فريشه الجليد القارية . وتؤدى كلتا الحالتين إلى تحرك المثلجة إلى ارتفاعات أقل حيث تكون درجات الحرارة أعلى ، وتسمى كل كمية الجليد أو الثلج التى تفقدها المثلجة كل عام بالنفاد (التلاشى) **ablation** . ويتحكم فى عملية فقد الجليد أربع عوامل هى:

1. الانصهار melting ، حيث تفقد المثلجة مادتها عندما يبدأ الجليد فى الانصهار.
2. **الانفصال الجليدى calving**، حيث تتحرك المثلجة وتصل إلى الشاطئ ، فتنفصل أجزاء من الجليد من مقدمة المثلجة وتتكسر وتكون جبالا جليديةicebergs .
3. التسامى **sublimation**، حيث يتحول الجليد مباشرة من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية فى المناخات الباردة .
4. التعرية بالرياح ، حيث تسبب الرياح القوية تعرية الجليد بالانصهار والتسامى .

وتنكمش المثالج نتيجة تدفئة وانصهار الجليد عند حافة المثلجة المتقدمة . وهكذا ، وعلى الرغم من أن المثلجة تتقدم للخارج أو لأسفل على المنحدرات ، فإن الحافة الجليدية يمكن أن تتراجع بالانصهار والانفصال الجليدى .

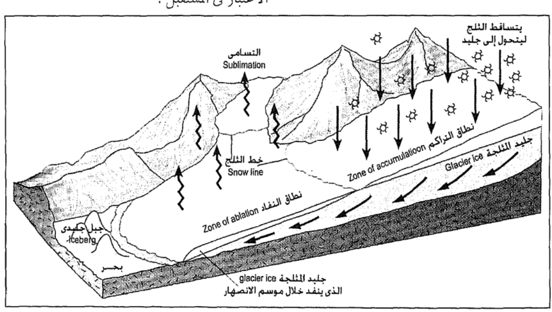
هـ. تغير حجم المثالج: العلاقة بين التراكم والنفاد

يؤدى الفرق بين التراكم والنفاد إلى التنبؤ بحدوث نمو أو انكماش فى المثلجة (شكل 7.14) ، حيث تنمو بعض المثالج بينما ينكمش البعض الآخر ، ويحدث ذلك استجابة للتغيرات المناخية على امتداد عدة عقود . وعلى امتداد آلاف السنين السابقة بقيت العديد من المثالج ثابتة . ويهتم كثير من العلماء الآن بتأثير تدفئة الكرة الأرضية على مناخها . لذلك اقترح الجيولوجيون ضرورة ملاحظة العلاقة بين التراكم والنفاد باستمرار . فانكماش المثالج فى مناطق معينة يمكن أن يكون تحذيرا مبكراً جداً لتغير محلى أو إقليمى فى المناخ . ففى عام 1995م أظهرت صور الأقمار الصناعية تراجعا واسعا للرف الجليدى الممتد فى غرب أنتاركتيكا ، وانفصال جليدى calving لجبل جليدى طوله حوالى 80 كسم (شكل 5.14). وقد نشأ هذا الانكماش من تدفئة الجانب الغربى لقارة أنتاركتيكا بحوالى 2.5° درجة مئوية خلال الخمسين عاماً الماضية . وتسبب التدفئة على مستوى الكرة الأرضية قلق العلماء الآن لأنها قد تؤدى إلى انفصال جليدى كبير لجبال جليدية ، مما يؤثر بالتالى على ارتفاع كبير فى مستوى سطح البحر .

و. المثالج : مصادر متحركة للماء فى المناطق الفقيرة به

تنساب كميات كبيرة من الماء المنصهر من أسفل الجليد ومن جوانبه عندما تنصهر المثلجة . وهذه المياه المنصهرة هى مصادر أساسية لمجارى الماء الباردة التى تنساب فى وديان الجبال أسفل المثالج . فإذا أقيم سد من ركام المثلجة فى مثل هذه الوديان ، فقد تتكون بحيرات عند نهاية المثلجة .

ويعتبر الماء العذب المنصهر من المثالج مصدرا للماء العذب فى المناطق الفقيرة بالماء، شريطة أن يكون نقله إلى المستخدمين اقتصاديا . وعلى الرغم من أن هذا الاقتراح قد يكون غير عملى الآن ، إلا أنه قد يؤخذ فى الاعتبار فى المستقبل .



شكل (7.14): مثلجة وادى كما تبدو عند نهاية موسم الانصهار ، حيث فقد جليد المثلجة والثلج المتواجد تحت خط الثلج snow line أثناء موسم الانصهار . أما فى نطاق التراكم والمتواجد فوق هذا الخط فإن الثلج الجليدى يضاف إلى المثلجة المتكونة من الثلج المتراكم فى الشتاء السابق .

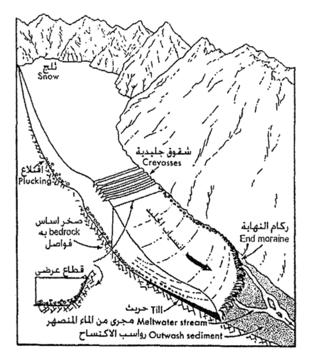
II. حركة المثالج

يبدأ الجليد فى التحرك حينما يصل سمك الجليد إلى عشرات الأمتار فيستطيع التغلب على الجاذبية الأرضية، وهكذا يتحول الجليد إلى مثلجة . وعندما تتحرك المثالج ، فإن الجليد يتشوه وينساب ببطء أسفل المنحدرات . ومن المهم أن نفهم الانسياب الجليدى ، لأن حركة المثالج هى المسئولة عن العمل الجيولوجى الضخم الذى يقوم به الجليد . وفى الحقيقة ، فإن نتائج حركة الجليد من التعرية والنقل والترسيب هى التى ألهمت العلماء إلى أهمية حركة الجليد . وعلى عكس الانسياب السريع للأنهار والذى يمكن ملاحظته مباشرة وبسرعة ، فإن حركة المثالج تكون بطيئة لدرجة أنه يبدو أن الجليد لا يتحرك على الإطلاق . ويزداد معدل حركة المثلجة بازدياد شدة الانحدار أو زيادة سمك الجليد . وحتى على السطح المستوى ، مثل الأرض المنخفضة القارية فإن الجليد ينساب للخارج إذا زاد السمك بدرجة كبيرة . وتنساب المثلجة القارية وتتحرك للخارج نتيجة ازدياد السمك كما ينساب السائل اللزج على السطح المستوى . ولكن كيف ينساب الجليد وهو مادة صلبة ، كما لو كان سائلا لزجا يتحرك ببطء؟

أ. ميكانيكية الانسياب الجليدى

تنساب المثالج أساسا بميكانيكيتين هما الانسياب اللدن والانزلاق القاعدى . ففى **الانسياب اللدن plastic flow** يتشوه الجليد وينزق داخليا على نطاق ميكروسكوبى. أما فى **الانزلاق القاعدى basal slip**، فإن الجليد ينزلق على المنحدرات على قاعدة المثلجة ، مثلما تنزلق قطعة من الصخور على لوح خشبى مائل .

ويكون الضغط قليلا على الأجزاء العليا من المثالج (أقل من 50 متراً من سطح المثلجة) . ويسلك الجليد عند هذه الضغوط المنخفضة كجسم صلب قابل للكسر ، ويتكسر أثناء سحبه نتيجة الانسياب اللدن للجليد من أسفل ، وتسمى هذه الكسور شقوقا جليدية **crevasses**. وتنشأ تلك الشقوق الطولية على سطح مثلجة الوادى نتيجة للاختلاف فى معدل الحركة بين أجزاء المثلجة المختلفة (شكل 8.14). وقد يصل عمق بعض هذه الشقوق إلى 100 متر من السطح. وتحدث الشقوق الجليدية بكثرة عندما يسحب الجليد عند جدران المنحنيات فى الوادى ، حيث تزداد شدة الانحدار .



شكل (**8.14**): المعالم الرئيسية لمثلجة الوادى ورواسبها ، حيث قطعت المثلجة على امتداد خطها المركزى ، لتوضيح نصفها فقط .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

III. التثلج ومعالم الأرض الجليدية

لا يظهر العمل الجيولوجى للمثلجة ، من تعرية ونقل وترسيب عند قاعدتها أو جوانبها، إلا بعد أن ينصهر الجليد ، مثلما لا نستطيع رؤية أثر القدم المطبوعة فى الرمل إلا بعد تحرك القدم عن الأثر . ويمكن أن نستنتج العلميات الطبيعية التى نتجت عن تحرك الجليد

من طوبوغرافية المناطق التى كانت تشغلها المثالج سابقاً، والمعالم المميزة التى تركتها. وتتضمن عملية التثلج glaciation عمليات التعرية والنقل والترسيب مثل بقية العمليات الجيولوجية التى تحدث على سطح الأرض .

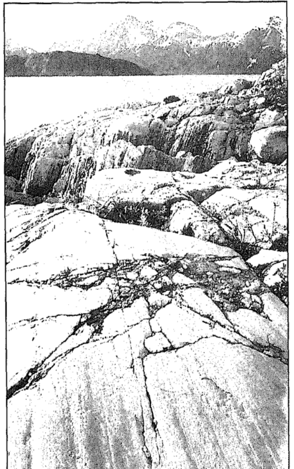
أ - التجوية الجليدية ومعالم التعرية

للمثالج قدرة هائلة على تعرية الصخور الصلبة . ويمكن لمثلجة وادى عرضها لايزيد عن بضع مئات من الأمتار أن تمزق وتطحن ملايين الأطنان من صخر الأساس فى عام واحد . ويقوم جليد المثلجة بتعرية هذه الكمية الضخمة من الرواسب من الصخر المكون لأرضية وجوانب المثلجة ، والتى تترسب بعد انصهار الجليد . ويعكس حجم هذه الرواسب قدرة الجليد كعامل تعرية أقوى من الماء أو الرياح . ويمكن أن نقارن بين معدلات وكميات الرواسب المترسبة فى العصور الجليدية والفترات الفاصلة بين تلك العصور. وتوضح هذه المقارنات أن كمية الرواسب الكلية المترسبة فى محيطات العالم كانت أكبر عدة مرات خلال العصور الجليدية الحديثة عنها خلال العصور غير الجليدية . ويرجع هذا الفرق إلى التعرية الشديدة بالمثالج مقارنة بالتعرية بالماء أو الرياح .

وعند تغيير شكل سطح الأرض الذى تتحرك فوقه المثلجة ، تعمل المثلجة مثل ماكينة جرف الثلج وآلة المبرد الحديدية بالإضافة إلى عمل الزلاجة . فهى تشبه جرافة الثلج التى تجرف الصخور والتربة التى تم تجويتها ، كما تقتلع كتلا من صخر الأساس . وتعمل المثلجة مثل آلة المبرد الحديدية ، حيث تكشط الصخر الصلب . كما تعمل مثل الزلاجة ، حيث تحمل الحمولة الناتجة من عمليتى الجرف والكشط ، بالإضافة إلى ركام الصخور الذى سقط على المثلجة من المنحدرات المجاورة .

1. معالم التجوية الجليدية الصغيرة

تحتوى قاعدة المثلجة معتدلة الحرارة على قطع صخرية ذات أحجام مختلفة تحملها المثلجة مع الجليد المتحرك . وتقوم الكسرات الصغيرة من الصخور والتى تحتويها قاعدة المثلجة بحك وكشط صخر الأساس الذى تتحرك فوقه المثلجة لتكون حزوزا طويلة ومتوازية تقريباً تسمى حزوزا جليدية **glacial striations** (شكل 9.14) . أما الكسرات الصخرية



شكل (9.14) : الصقل والحزوز striations والأخاديد grooves الجليدية على صخر الأساس . وتدل الحزوز على اتجاه حركة الجليد ، وتعتبر مفاتيح مهمة للاستدلال على حركة المثالج القارية .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

الأكبر حجما والتى تقوم المثلجة بسحبها على صخر الأساس، فإنها تحفر أخاديد جليدية glacial grooves تصطف فى اتجاه انسياب المثلجة. وتعمل حبيبات الرمل الدقيق والغرين والمحمولة فى جليد قاعدة المثلجة مثل ورق السنفرة، حيث تقوم بصقل الصخر حتى يصبح سطحه ناعما وعاكسا للضوء.

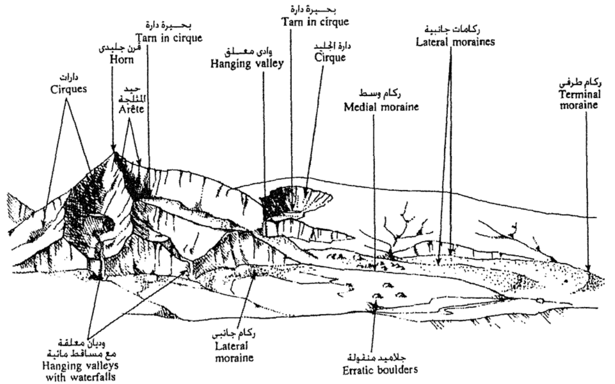
وحيث إن الحزوز والأخاديد الجليدية تكون مصطفة ومرتبة فى اتجاه انسياب الجليد، فإنها تستخدم بالإضافة إلى بعض معالم التجوية المصطفة الأخرى فى استنتاج مسار انسياب المثالج بعد زوالها.

2. المعالم الأرضية للجبال المتثلجة

إن المناظر الطبيعية الخلابة لمعظم جبال العالم المرتفعة هى نتيجة مباشرة للنحت الجليدى الذى كون مجموعة مميزة من المعالم الأرضية وهى:

دارة الجليد: تعتبر دارات الجليد ضمن أكثر المعالم المميزة للجبال المتثلجة شيوعا. وتنشأ دارة الجليد ضمن سلسة من أشكال التعرية تقوم بنحتها مثالج الوديان أثناء انسيابها من مكان نشأتها إلى حدودها السفلية. ومع استمرار التعرية، تزداد دارات الجليد فى الحجم عند رؤوس الوديان وتتقارب وتتقابل تدريجيا عند قمة الجبل لتكون مرتفعا مستطيلا قمته حادة مسننة يعرف **بحيد المثلجة arête**. وعندما تنحت ثلاث دارات جليدية أو أكثر فى قمة الجبل، تتكون قمة حادة مرتفعة هرمية الشكل، ذات جوانب شديدة الانحدار تعرف **بالقرن الجليدىhorn** (شكل 10.14).

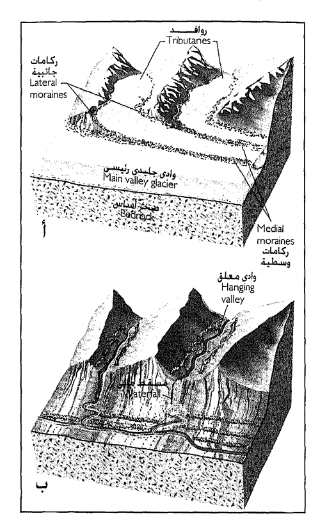
الوديان الجليدية: تختلف الوديان الجليدية glacial valleys التى شكلتها مثالج سابقة عن وديان الأنهار أو المجارى المائية العادية عموما فى جوانب عدة. فعندما تتحرك مثلجة الوادى وتنحدر من الدارات الجليدية، فإنها تنحت واديا أو تعمق مجرى مائيا سابقا،



شكل (**10.14**): بعض المعالم المثلجية المصاحبة لمثلجة الوادى.

(After Foster, R.J., 1988: General Geology, 5th edition, Merril Publishing Company, Columbus).

ويتكون نتيجة لذلك وادى له بروفيل (مقطع جانبى) يشبه الحرف U ، ويعرف بواد مشابه للحرف يو **U-shaped valley** . وتكون الوديان الجليدية ذات قيعان مستوية وحوائط شديدة الانحدار ، على عكس الوديان المتكونة فى عديد من الأنهار المنحدرة من الجبال والتى يأخذ بروفيلها شكل حرف V .



شكل (**11.14**): نشأة الوديان المعلقة **hanging walls** والمساقط المائية **waterfalls** من روافد مثالج الوادى .

أ) تلتقى الروافد المثلجية أثناء عملية التثلج بمثلجة رئيسية على مستويات مختلفة

ب) بعد انتهاء عملية التثلج ، ينصهر الجليد وتبقى المنطقة بالوديان المعلقة . ويكوّن المجرى المائى مسقطا مائيا عندما يندفع فوق جانب الوادى المعلق .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ولا تختلف المثالج والمجارى المائية فى شكل الوديان التى تكونها فقط ، بل فى الطريقة التى تتصل بها الروافد مع الوديان الرئيسية . فعلى الرغم من أن سطح الجليد يكون مستويا عند النقطة التى يلتقى فيها رافد المثلجة مع الوادى الرئيسى للمثلجة ، إلا أن قاع الوادى الرافد قد يكون مرتفعا جدا عن الوادى الرئيسى . وعندما يذوب الجليد وتزول المثلجة، فإن الوادى الرافد يكون قاعه أعلى من قاع الوادى الرئيسى ، ولذلك يعرف بوادى معلق **hanging valley** (شكل 11.14) . وبعد ذوبان الجليد ، فإن المجارى المائية تشغل هذه الوديان ، حيث يتميز اتصال الوادى الرئيسى بالرافد بوجود مساقط مائية waterfalls نتيجة أن المجرى المائى فى الوادى المعلق يندفع بسرعة على الجرف شديد الانحدار الذى يفصله عن الوادى الرئيسى تحته.

3. المعالم الجليدية الناشئة عن المثالج القارية والقلنسوات الجليدية

معالم السحج: يظهر على صفحة الأرض التى شكلتها الفرش الجليدية معالم التعرية الصغيرة نفسها والمميزة للوديان المتثلجة . وتساعد الحزوز striations الجليدية فى الاستدلال على خطوط انسياب ومسارات الفرش الجليدية التى تلاشت منذ مدة طويلة .

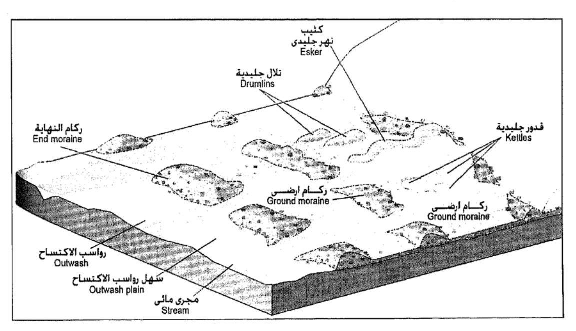
- **التلال والقدور الجليدية**: يلاحظ فى عديد من المناطق التى كانت تشغلها المثالج القارية أن سطح الأرض قد تحول إلى مجموعة من التلال (حيود) الناعمة الانسيابية المتوازية تقريباً ، والتى تسمى **بالتلال الجليدية drumlins** ، حيث يكون اتجاه استطالتها هو اتجاه تحرك الجليد (شكل 12.14) . وتوجد التلال الجليدية فى مجموعات ، وتأخذ عادة شكل سفينة مقلوبة ، حيث يساعد هذا الشكل على تقليل مقاومة الأجسام لجليد المثلجة المنساب فوقها وحولها . ويتراوح ارتفاع التلال الجليدية من 25 إلى 50 مترا ،

بينما يبلغ طولها حوالى كيلومتر واحد. وتتكون التلال الجليدية من رواسب ترسب معظمها بالجليد. وتوجد بعض التلال الجليدية المتكونة من صخر الأساس، وتسمى تلالا جليدية صخرية rock drumlins، حيث يرجع تكونها إلى التعرية بالجليد المنساب. كما تتميز المناطق التى كانت تشغلها المثالج القارية بوجود حفر ومنخفضات نشأت عن تجمع الرواسب فى مقدمة المثلجة المتراجعة حول كتل من الجليد الراكد، حيث تدفن تلك الكتل الجليدية. وعندما تنصهر كتل الجليد فى النهاية، تتكون حفر أو منخفضات تعرف بالقدور الجليدية kettles (شكل 12.14).

ب. نقل الرواسب بالمثالج

تختلف المثلجة عن المجرى المائى فى الطريقة التى يتم بها نقل حمولة الحبيبات الصخرية. فعلى عكس المجارى المائية، فإن جزءاً من الحمل الخشن للمثلجة يمكن حمله على جوانب أو حتى فوق سطح المثلجة، كما تستطيع المثلجة حمل أحجام من الصجر أكبر لمسافات بعيدة. كما يمكنها نقل القطع الصخرية الصغيرة والكبيرة جنبا إلى جنب دون أن تفرزها طبقاً للحجم أو الكثافة إلى حمل قاع وحمل معلق، كما هو الحال فى الأنهار. ولذلك تكون الرواسب التى تكونها المثلجة رديئة الفرز وغير متطبقة.

ويتركز حمل المثلجة عند قاعها وجوانبها، حيث يتماس فى تلك المناطق صخر الأساس مع المثلجة، وحيث تكون عمليتى السحج abrasion والاقتلاع **plucking** (شكل 8.14)مؤثرتين. ويرجع وجود معظم الركام الصخرى فوق سطح مثالج الوادى إلى الصخور المتساقطة من الجروف المجاورة لها. وعندما تلتقى مثلجتان، يندمج الركام الصخرى عند حوافهما ليكونا ركاما جليديا moraineوسطيا مميزا لونه داكن.



شكل (**12.14**): معالم الجليد الناشئة عن تراجع فريشة جليدية receding ice sheet. وتشمل تلك المعالم التلال الجليدية drumlins وهى تلال متوازية تقريبا يكون اتجاه استطالتها هو اتجاه تحرك الجليد. كما تشمل أيضا الأنهار الجليدية eskers وهى رواسب تراكمت على امتداد طويل، وتكونت من مجرى مائى يسيل تحت الجليد. ومنها أيضا القدور الجليدية kettles وهى حفر أو منخفضات صغيرة فى رواسب المثلجة، نشأت عن تراكم الرسوبيات حول كتلة من الجليد ذابت بعد هذا التراكم وتركت مكانها خاليا على هيئة قدر.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ويتكون معظم الحمل فى جليد قاع المثلجة من صخر مطحون ناعم للغاية (حجم الرمل الناعم جدا والغرين) يعرف باسم **دقيق صخرى rock flour** ، حيث تكون أسطح الحبيبات حادة ومزواة نتيجة التكسير والطحن . وينشأ الدقيق الصخرى نتيجة احتكاك الفتات الصخرى الذى يحمله الجليد بصخور مجرى المثلجة .

ج. الرواسب الجليدية

تسمى كل الرواسب المتكونة سواء بالمثلجة نفسها أو بالمجارى المائية الناشئة عن انصهار جليد المثلجة، **منجرفات مثلجية glacial drift** ، أو للتبسيط **منجرفات drift** سواء على اليابس أو فى البحر. ويرجع استخدام اسم المنجرفات إلى أوائل القرن التاسع عشر ، حينما ساد اعتقاد غامض بأن كل هذه الرواسب قد انجرفت إلى أماكن استقرارها خلال فيضان سيدنا نوح عليه السلام أو بواسطة مجارى مائية قديمة أخرى . وتضم المنجرفات المثلجية الرواسب المرتبطة بالجليد المتحرك أو الجليد الراكد غير المتحرك . وقد تم التعرف على عديد من الرواسب التى تكون سلاسل متدرجة من رواسب غير مفروزة إلى رواسب تم فرزها . ومن الخصائص التى تميز المنجرفات عن بقية الرواسب التى نشأت بعوامل تعرية أخرى ، أن الرواسب الجليدية تتكون أساسا من حطام صخرى تم تجويته ميكانيكيا ولم يتعرض إلا لقليل من التجوية الكيميائية قبل الترسيب . ولذلك تشمل مكونات الرواسب الجليدية المعادن التى تكون عرضة للتحلل الكيميائى مثل معادن الهورنبلند وفلسبارات البلاجيوكليز.

1. الرواسب المتكونة بالجليد

الحريث والجلاميد المنقولة: الحريث (تِلّ) **till** عبارة عن منجرفات مثلجية غير مفروزة nonsorted ترسبت مباشرة من الجليد ، وتحتوى على كافة أحجام الفتات من الصلصال والرمل وحتى الجلاميد . ويمثل الحريث أحد نهايتى السلسلة التى تتدرج من الرواسب الجليدية غير المفروزة إلى الرواسب الجليدية المفروزة . وتتواجد الحبيبات الصخرية فى الحريث بنفس حالتها عند ترسبها من الجليد. وتتكون معظم رواسب الحريث من خليط عشوائى من الفتات الصخرى ، حيث تحيط أرضية من راسب دقيق التحبب بفتات صخرى مكون من مختلف الأحجام . وتكون أسطح الحصى والفتات الصخرى الأكبر حجما فى الحريث ناعمة ومسحوجة ، كما يكون فى بعضها حزوز striations . ويميل كل من الفتات وحبيبات الأرضية الخشنة إلى أن تترتب بحيث يوازى محور استطالتها اتجاه حركة الجليد أثناء انسيابه . وتساعد مثل هذه القطع فى تمييز الحريث من الرواسب الأخرى ، والتى قد تتكون من خليط من رواسب مختلفة الحجم مثل الحطام الناشئ أثناء الانهيارات الأرضية من الانسياب الطينى أو الانزلاق الصخرى .

وصخر الحريث (تلليت) tillite هو حريث قديم أصبح صخرا ، خاصة الحريث الأقدم من البليستوسين. وفى معظم الأحيان ، لا تكون كل الجلاميد والكسرات الصخرية الأصغر حجما فى الحريث مكونة من نوعية صخر الأساس نفسها ، الذى يسفل المثلجة . ويدل ذلك على أن مكونات الحريث قد نقلت إلى موقعها الحالى من مكان آخر . وتسمى الكسرات الصخرية المترسبة من المثلجة ، والتى يختلف تركيبها الصخرى عن تركيب صخر الأساس bedrock الذى يسفلها بالجلاميد المنقولة (الشاذة) **erratics** (من اللاتينية بمعنى طواف أو هائم) . وقد تزن بعض الجلاميد المنقولة الضخمة مئات الأطنان ، وتوجد على بعد عشرات أو حتى مئات الكيلومترات

من مصدرها الأصلى . وتسمى المنجرفات المترسبة على قاع البحر من الأرفف الجليدية بمنجرفات جليدية بحرية glacial marine drift .

الركامات الجليدية: تحمل المثلجة المتحركة ركاما صخريا ناتجا من تعرية الأرض التى مرت عليها المثلجة، أو المتساقط على سطح المثلجة من الجروف المجاورة . وعندما يُنقل الركام ويبدأ الجليد فى الذوبان وينقص سمك الجليد نتيجة عملية النفاد ، يبدأ الركام فى الترسب . وتسمى المنجرفات التى حملها الجليد ثم تراكمت بعد انصهاره ، ولا يكون لشكل سطحها علاقة بصخر الأساس الموجود أسفلها **بالركام الجليدى** (مورين) **moraine** . وقد استخدم هذا المصطلح فى الأصل الفلاحون الفرنسيون لوصف الهضاب المكونة من الركام بالقرب من حواف المثالج فى جبال الألب الفرنسية . وتتكون كل أنواع الركامات الأرضية بغض النظر عن الشكل أو الموقع من رسوبيات الحريث. وربما يكون مصطلح الركام الجليدى أكثر المصطلحات شيوعاً فى المعالم الأرضية المكونة من رواسب ثلجية .

وهناك عدة أنواع من الركامات الجليدية ، يسمى كل منها طبقاً لوضعه بالنسبة للمثلجة التى تكوّن منها. وأكثر هذه الأنواع وضوحاً فى الحجم والشكل هو ركام النهاية (مورين النهاية) end moraine (شكل 8.14) ، والذى يتراكم عند مقدمة المثلجة على شكل حيود أو تل مستطيل من المنجرفات الجليدية . وتسمى الركامات النهائية التى تحدد أقصى تقدم للمثلجة بالركامات الطرفية terminal moraines ، وهى تعتبر من أفضل الأدلة لمعرفة الامتداد السابق للمثلجة. وتسمى المنجرفات الجليدية المتحركة على امتداد جوانب الوادى بالركام الجانبى lateral moraine .

وتندمج الركامات الجانبية لمثلجتين متحدتين ليكونا ركاما وسطيا medial moraine (شكل 11.14).

والركام الأرضى ground moraine هو طبقة من المنجرفات الجليدية ترسبت تحت الجليد . ويتراوح سمك الركامات الأرضية من الرقيق مع وجود هضاب صغيرة وأرضيات مكشوفة من صخر الأساس ، إلى الكبير الذى يكفى لتغطية وإخفاء صخر الأساس تماماً.

2. الرواسب المتكونة بالماء: المنجرفات المتطبقة

تتكون بعض المنجرفات الجليدية من رواسب متطبقة ومفروزة ، عكس الحريث والمنجرفات الجليدية البحرية المترسبة على قاع المحيط ، غير المفروزة عموماً . وهذا النوع من المنجرفات الجليدية لايترسب مباشرة من جليد المثالج . ولكن يتكون من المياه المنصهرة والمنسابة من الجليد . ويتراوح حجم المنجرفات المتطبقة من حصى رملى خشن ردئ الفرز جدا ترسب من مجارى مائية مضطربة إلى رواسب غرين وصلصال جيد الفرز ترسب من مياه ساكنة .

رواسب الاكتساح: يسمى الراسب المتطبق المتكون فى مجارى المياه التى تنساب من حافة المثلجة عند انصهارها **برواسب الاكتساح أو الرواسب سهلة الغسل outwash** ، حيث يغسل الراسب بعيدا عن الجليد (شكل 8.14) . ومثل هذه المجارى المائية يكون لها نمط مُجدُول بسبب حمولة الراسب الكبيرة .

وتسمى تراكمات الغرين والصلصال المترسبة على قاع بحيرة عند حافة المثلجة ، والتى تشمل طبقات متبادلة من طبقات خشنة الحبيبات وأخرى دقيقة الحبيبات **بالصلصال الرقائقى الحولى varve** . ويتكون هذا الراسب من زوج من الطبقات المتكونة خلال عام واحد بسبب التجمد الموسمى لسطح البحيرة . ففى فصل الصيف ، وعندما تكون البحيرة خالية من

الجليد، تترسب الرواسب الخشنة عندما تنساب مجارى المياه المنصهرة من المثلجة إلى البحيرة ، بينما فى فصل الشتاء يتجمد سطح البحيرة ، ويصبح الماء أسفل هذا السطح ساكنا ، ويترسب الصلصال الدقيق الحبيبات ، مكونا طبقة رقيقة فوق الطبقة الخشنة الحبيبات التى تكونت فى فصل الصيف . ويعتبر الصلصال الرقائقى الحولى أحد أشكال رواسب الاكتساح .

3. تربة الصقيع الدائم

تكون الأرض فى حالة تجمد دائم فى المناطق شديدة البرودة ، حيث لا ترتفع درجة الحرارة فى فصل الصيف إلا إلى الحد الذى يسبب انصهار طبقة سطحية رقيقة . وتغطى التربة المتجمدة طوال السنة حوالى 25٪ من سطح اليابس على الكرة الأرضية ، وتعرف بتربة الصقيع الدائم **permafrost** . وتشمل تربة الصقيع الدائم ، بالإضافة إلى التربة نفسها، التجمعات من بلورات الجليد فى طبقات وأوتاد وكتل غير منتظمة . وتختلف بالطبع نسبة الجليد إلى التربة ، وكذلك سمك تربة الصقيع الدائم من منطقة إلى أخرى . وقد يصل سمك طبقة الصقيع الدائم فى ألاسكا وشمال كندا من 300إلى 500 متر .

وتبقى الأرض تحت طبقة الصقيع الدائم والمعزولة عن البرودة القارصة عند السطح، فى حالة غير متجمدة نتيجة التسخين بالحرارة الداخلية للأرض والمنسابة من أسفل . ويكون التعامل مع تربة الصقيع الدائم صعبا ، خاصة عند إقامة المشاريع الهندسية مثل إنشاء الطرق والمبانى وتمديد أنابيب البترول ، حيث تنصهر هذه التربة أثناء الحفر ، ولايستطيع الماء المنصهر تخلل التربة التى مازالت متجمدة أسفل الحفر ، ولذلك يبقى عند التربة السطحية والمشبعة بالماء ، مما يؤدى إلى الزحف والانزلاق والتدهور .

IV. العصور الجليدية: تثلج البليستوسين

بدأ العلماء الأوربيون منذ عام 1821م فى تعرف معالم وخصائص التثلج فى أماكن بعيدة عن أى مثالج حالية . وتوصلوا إلى أن المثالج قد غطت يوما ما مناطق شاسعة. وقد كان العالم السويسرى لويس أجاسى Louis Agassiz أول من اقترح مفهوم العصر الجليدى glacial age فى عام 1837 م . وعلى الرغم من اعتقاد الكثيرين أن فكرة أجاسى كانت خيالية ، إلا أن مفهوم العصر الجليدى أخذ ينتشر تدريجيا على مدى واسع من خلال عمل عدد من الجيولوجيين . واليوم تمدنا دراسة العصور الجليدية بالأدلة على التغيرات المناخية السريعة على مستوى الكرة الأرضية ، وبمعلومات عن كيفية استجابة الأنظمة الطبيعية والبيولوجية الطبيعية لتلك التغيرات . كما أنها تعطينا أيضا معلومات مهمة عن سلوك المثالج، وبالتالى المساعدة فى فهم بعض العمليات الطبيعية الأساسية فى الأرض والوشاح العلوى.

أ. مثالج العصر الجليدى

حين دخلت الأرض حقب الحياة الحديثة Cenozoic Era المتأخر أخذ المناخ يبرد تدريجيا وببطء على امتداد عشرات الملايين من السنين . وقد تعرضت الأرض خلال حين البليستوسين الذى يشمل المليونين الأخيرين من تاريخ الأرض لعدد من الدورات الجليدية ـ بين الجليدية ، والتى تخللت اتجاه المناخ نحو البرودة بشكل عام على المدى الطويل . وتوضح الدراسات أننا فى الوقت الحالى قد اقتربنا من الحد الأقصى للدفء فى هذه الدورة ، ليبدأ الهبوط فى درجة الحرارة لنصل إلى عصر جليدى جديد ، والذى سوف يبلغ ذروته خلال عدة آلاف من السنين فى المستقبل.

وقد تكوّن فريش جليدى شاسع فوق شرق كندا منذ حوالى 30000 ألف سنة مضت فى أواخر البليستوسين ، ثم بدأ فى الانتشار نحو الجنوب ناحية الولايات المتحدة وغربا تجاه جبال روكى . وفى الوقت نفسه ، نشأ فريش جليدى آخر فوق الأراضى المرتفعة من اسكندنافيا وانتشر جنوبا وعبر شمال غرب أوروبا حيث غمر صفحة الأرض (شكل 13.14). كما تكونت فرش جليدية شاسعة أخرى وانتشرت فوق المناطق القطبية الشمالية من شمال أمريكا وأوراسيا ، والتى تضم بعض المناطق المغمورة الآن ببحار قطبية ضحلة ، وكذلك فوق سلاسل جبال غرب كندا . ولقد نمت الفرش الجليدية فى جرينلاند وأنتاركتيكا وتقدمت عبر مناطق الرفوف القارية المجاورة ، والتى اكتشفت نتيجة انحسار سطح البحر . وتكونت أيضا مثالج فى سلاسل الجبال الرئيسية فى العالم ، والتى تشمل جبال الألب ، والأنديز والهيمالايا وروكى ، بالإضافة إلى عدد أصغر من المدود الجبلية ، وعلى القمم المنعزلة المتناثرة حول العالم.

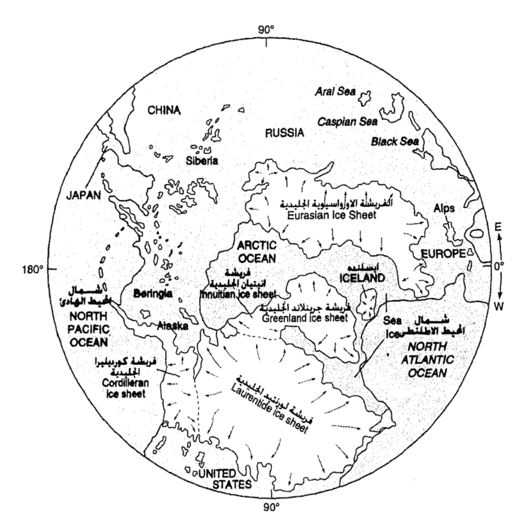
هذا ، وقد بلغت مساحة المثالج فى العصور السابقة أكثر من 44 مليون كم^2 تمثل حوالى 29 ٪ من مساحة اليابس على الكرة الأرضية بينما يغطى جليد المثالج حاليا حوالى 10 ٪ فقط من مساحة سطح اليابس على الأرض ، يقع 84 ٪ من هذه المساحة فى المنطقة القطبية الجنوبية .

ب. تحولات المجارى المائية والبحيرات الجليدية

تتسبب الفرش الجليدية فوق القارات فى تمزيق الأنهار (أنظمة المجارى المائية الرئيسية) . وقد تسبب التجاوز المتكرر للفرش الجليدية فى زمن البليستوسين فى تغيير مسارات أنهار ميسورى وأوهايو فى أمريكا الشمالية إلى مسارات جديدة خارج حواف الجليد . وقد تكونت بحيرات تحدها سدود جليدية ، عندما سدت المثالج مجارى وممرات الصرف الموجودة قبل التثلج . كما تغيرت مواقع وأحجام البحيرات الواسعة التى يحدها الجليد ، والتى تكونت خارج حدود الفريشة الجليدية الممتدة فى شرق أمريكا الشمالية ، نتيجة تراجع المثلجة . كما تكونت بحيرات كبيرة يحفها الجليد فى شمال آسيا أيضا عندما تحرك الجليد فى اتجاه الجنوب فى غرب سيبيريا وتسبب فى تمزيق وسد مجارى الأنهار الرئيسية المنسابة ناحية الشمال .

جـ. انخفاض مستوى سطح البحر

عندما تتكون مثالج كبيرة على اليابسة ، فإنها تستمد المياه اللازمة لتكونها واستمرارها من المحيطات . ونتيجة لذلك ، ينخفض مستوى سطح البحر فى تناسب مع حجم الجليد المتكون على اليابسة . وقد انخفض مستوى سطح البحر فى العالم حوالى 100 متر على الأقل خلال أحدث العصور الجليدية ، مما أدى إلى ظهور امتدادات كبيرة من الرفوف القارية الضحلة كأرض جافة . وفى هذا الوقت كان شاطئ المحيط الأطلنطى للولايات المتحدة جنوب نيويورك يبعد حوالى 150كم شرق وضعه الحالى . وفى الوقت نفسه ، أدى انخفاض مستوى سطح البحر إلى اتصال بريطانيا بفرنسا عند المنطقة التى يشغلها القنال الإنجليزى الآن، كما كونت أمريكا الشمالية وآسيا كتلة أرضية متصلة عبر ما يعرف الآن بمضيق بيرنج Bering Strait (شكل 13.14) . وقد عملت هذه المناطق اليابسة وغيرها على انتقال الحيوانات والنباتات والإنسان بحُريّة بين مناطق اليابس التى تفصلها الآن مياه المحيطات .

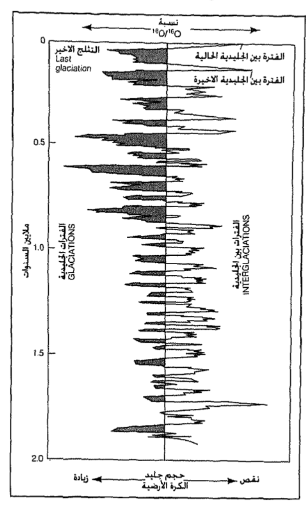


شكل (**13.14**): المناطق التى غطاها الجليد فى نصف الكرة الشمالى خلال العصر الجليدى الأخير . وتوضح الأسهم الاتجاه العام لانسياب الجليد. وقد رسمت خطوط الشواطىء كما كانت فى ذلك الوقت ، حيث كانت على مستوى أقل من الوضع الحالى بمائة متر على الأقل.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

د. تشوه القشرة الأرضية

لقد سبب وزن الفرش الجليدية الضخمة هبوط قشرة الأرض الموجودة أسفلها ، وهى العملية التى سنستعرضها فى الفصل السادس عشر (شكل 27.16). ويعنى الفرق فى الكثافة بين صخور القشرة الأرضية (حوالى 2.7جم/ سم^3) وجليد المثلجة (حوالى 0.9جم / سم^3) أن القشرة الأرضية أسفل فريشة جليدية سمكها حوالى 3 كم قد تسبب هبوط القشرة الأرضية بمقدار 1 كم تقريبا . ومازال منطقة خليج هدسون فى كندا والتى كانت تقع منذ حوالى 20000 سنة بالقرب من مركز فريشة لورينتيد الجليدية الضخمة Laurentide Ice Sheet (شكل 15.1) فى صعود مستمر نتيجة تعديل القشرة الأرضية بعد إزالة حمل الجليد . ويمكننا باستخدام مثل تلك الأدلة قياس المعدل الذى ارتفعت به صخور القشرة الأرضية بدقة خلال آلاف السنين . وتمدنا مثل هذه القياسات بمعلومات مهمة عن سلوك الغلاف الصخرى (الليثوسفير) والغلاف اللدن (الاسثينوسفير) عند تعرضهما لأحمال متغيرة.



شكل (**14.14**): منحنى متوسط التغير فى نسبة نظائر O^{18}/O^{16} فى عينات أسطوانية أخذت من رواسب قاع المحيط الأطلنطى ، ، وتمثل التغير فى حجم الجليد على مستوى الكرة الأرضية خلال المليونى سنة الأخيرة من عمر الأرض . وخلال المليون سنة الأخيرة كان طول كل دورة جليدية – بين جليدية يصل إلى حوالى 100000 سنة ، بينما كان طول الدورات السابقة حوالى 40000 سنة .
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

هـ. التثلجات المبكرة

كان يُظن حتى وقت قريب أن الأرض تعرضت لأربعة عصور جليدية خلال البليستوسين . وقد اتضح أنه لابد من تغيير وجهة النظر التقليدية هذه عندما أثبتت دراسة الرسوبيات البحرية العميقة وجود تتابع سميك من رواسب المثالج . كما أظهرت تلك الدراسات أيضا أن أحدث هذه التثلجات ، يضاهى أحدث رواسب المنجرفات المثلجية الشاسعة على اليابسة ، بناءً على تحديد العمر المطلق بالكربون المشع . وقد أظهر تحديد عمر هذه الرسوبيات البحرية والتى تكونت خلال 800000 سنة الأخيرة ، أن متوسط عمر الدورات الجليدية ـ بين الجليدية كان حوالى 100000 سنة . أما بالنسبة للبليستوسين كله ، فقد كُشف النقاب عن أكثر من 20 عصرا جليديا ، بدلا من العصور الجليدية الأربعة التقليدية . وقد تحقق الجيولوجيون الآن من أن سجل التثلج على اليابسة غير كامل وبه عدد من علاقات عدم التوافق ، بينما يحتوى عدد من البحار العميقة على سجل مستمر للترسيب .

1. الدليل من قاع البحر

تمدنا الرواسب البحرية العميقة بأدلة جيدة عن الدورات الجليدية ـ بين الجليدية . ويُظهر المحتوى الحفرى لرواسب قاع البحر والتى أخذت من العينات الأسطوانية أثناء حفر الآبار وجود تغيرات متكررة فى تركيب المجموعات النباتية والحيوانية فى المياه السطحية من أشكال بين جليدية دافئة إلى أشكال جليدية باردة ، ثم العودة إلى الأشكال بين الجليدية الدافئة مرة أخرى . كما تتغير نسبة نظائر الأكسيجين $^{18}O/^{16}O$ فى طبقات الحمأ ooze (رواسب المحيطات العميقة) الجيرية بنفس النمط . ويُعتقد أن تغيرات نسبة $^{18}O/^{16}O$ هذه فى رواسب البليستوسين البحرية تمثل أساسا تغيرات فى حجم الجليد فى العالم ، بناءً على تحليل هذه النظائر فى الأصداف الموجودة فى تلك الرواسب . فقد أظهرت الدراسات أنه عندما يتبخر الماء من المحيطات ويتساقط على اليابسة ليكوّن المثالج ، فإن الماء الذى يحتوى على نظير ^{16}O الأخف يتبخر بسهولة عن الماء الذى يحتوى على نظير ^{18}O الأثقل ، مما يعنى أن مقدارًا أكبر من نظير ^{18}O الثقيل يبقى فى ماء المحيطات . ونتيجة لذلك ، فإن مثالج البليستوسين قد احتوت كمية أكبر من النظير

الأخف ^{16}O ، بينما احتوت المحيطات على كمية أكبر من النظير الأثقل ^{18}O امتصته الكائنات الحية . ولذلك فإن منحنيات النظائر المستمدة من رواسب قاع البحر تمدنا بقراءة مستمرة لتغير حجم الجليد على الأرض (شكل 14.14) . وحيث إن المثالج تزداد أو تتقلص فى الحجم استجابة للتغيرات المناخية ، فإن منحنيات النظائر تعطى أيضا صورة عامة للتغيرات المناخية على الأرض.

2. التثلجات قبل حين البليستوسين

تم تعرف مثالج أقدم من البليستوسين بناءً على وجود صخور الحريث والحزوز الجليدية على أسطح هذه الصخور . ويرجع عمر أقدم التثلجات المسجلة إلى حوالى 2.3 بليون سنة مضت فى دهر البروتيروزوى المبكر . كما حُددت فترات جليدية أخرى فى صخور البروتيروزوى المتأخر إلى الباليوزوى المتأخر (حقب الحياة القديمة) . ويُعتقد أنه قد حدث أكثر من 50 تثلجا خلال حقب الباليوزوى المتأخر فقط. ويوضح (شكل 15.14) المناطق التى غطاها الجليد فى العصر الكربونى فى جنوب غرب مصر ، والتى كانت تمثل جزءا من قارة الجندوانا فى ذلك الوقت .

V. أسباب حدوث العصور الجليدية

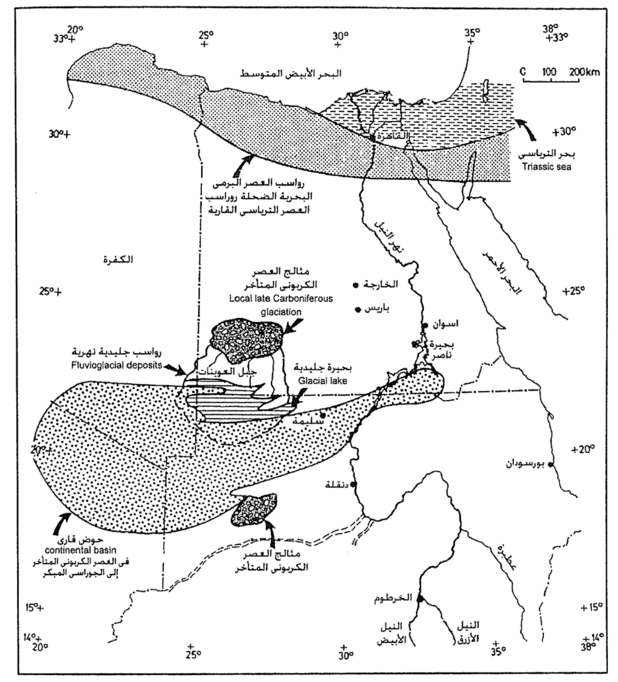
لقد أصبحت أسباب حدوث العصور الجليدية موضوعا لبحوث مستمرة منذ أصبح الجيولوجيون مقتنعين بأن الأرض قد تعرضت لتتابع من العصور الجليدية . ويحتاج الوصول إلى الحل نهائى لمشكلة العصور الجليدية تضافر كل جهود المتخصصين فى فروع العلم المختلفة. وفيما يلى استعراض لبعض أسباب حدوث العصور الجليدية .

أ. العصور الجليدية وتغير وضع القارات

لقد أمكن التعرف فى السجل الجيولوجى على تتابعات لعصور جليدية استمر كل منها عشرات الملايين من السنين . ويعتبر تغير المواقع الجغرافية ببطء هو أقرب الاحتمالات لتفسير النمط الخاص بتلك التتابعات . ويشمل التغير فى المواقع الجغرافية (1) تحرك القارات نتيجة حركة ألواح الغلاف الصخرى التى تحمل تلك القارات إلى خطوط العرض العليا أو بعيدا عنها ، (2) تكون سلاسل جبلية عندما يتراكب لوح فوق لوح آخر وكذلك نتيجة تصادم القارات، و(3) فتح وغلق الأحواض المحيطية والممرات البحرية بين كتل الأرض المتحركة .

وبالإضافة إلى ذلك ، فإن المثالج تكون شائعة على الأخص فى الأماكن التى تمدها الرياح بالرطوبة والناتجة عن تبخير الماء من المحيط المجاور . واليوم ، فإن 84 بالمائة من جليد المثالج على الأرض يوجد فى قارة أنتاركتيكا ، حيث تكون درجات الحرارة دائماً تحت درجة التجمد . والمثالج التى توجد عند خط الاستواء أو بالقرب منه تكون فقط عند الارتفاعات العالية للغاية .

ويشير عديد من الأدلة إلى أن مواضع الكتل الأرضية ، بالإضافة إلى شكلها وارتفاعاتها ، قد تغيرت مع الزمن (نظرية تكتونية الألواح) . وتؤدى هذه العملية إلى تغيير مسارات التيارات المحيطية وحركة الغلاف الجوى . وعندما نجد الآن الدليل على وجود تثلج حدث نتيجة فريشة جليدية سابقة فى المناطق القريبة من خط الاستواء ، فإننا نستدل على أن تلك الأراضى كانت تقع قديما بالقرب من المناطق القطبية حيث توجد إمكانية بقاء المثالج .



شكل (**15.14**): المناطق التى غطاها الجليد فى العصر الكربونى فى جنوب غرب مصر وشمال غرب السودان ، والتى كانت تمثل جزءا من قارة الجندوانا فى ذلك الوقت .

وينكشف الآن فى جنوب أمريكا وجنوب أفريقيا والهند واستراليا وأنتاركتيكا رواسب جليدية من حقب الحياة القديمة (الباليوزوى) المتأخر. وقد فُسر وجود صخور التيليت والصخور الجليدية الأخرى بأنها رواسب مثالج قارية غطت لعدة مرات أجزاء شاسعة من قارة جنوبية ضخمة تسمى الجندوانا Gondwanaland ، والتى كانت تقع بالقرب من القطب الجنوبى . ونتيجة تكسر أجزاء كبيرة من

الجندوانا وحركة هذه الأجزاء بعد ذلك ناحية الشمال فإن عديدًا من الصخور الجليدية القديمة توجد الآن فى مناطق قريبة من خطوط العرض المنخفضة (شكل 5.17) .

ويشير اختفاء أى رواسب جليدية واسعة الانتشار فى صخور حقب الحياة الوسطى (الميزوزوى) إلى أنه خلال ذلك الحقب تحركت معظم كتل اليابسة بعيدا عن المناطق القطبية إلى حيث كان المناخ معتدلا . وقد تحركت الكتل الأرضية إلى المناطق القطبية مرة أخرى أثناء حقب الحياة الحديثة (السينوزوى) المبكر، وكانت الحركات التكتونية بصدد رفع مساحات كبيرة من غرب الولايات المتحدة ووسط آسيا إلى ارتفاعات عالية . وفى حقب الحياة الحديثة المتوسط بدأت الأرض تتعرض مرة أخرى لعصر جليدى طويل آخر.

ب. العصور الجليدية والنظرية الفلكية

أثبتت دراسة الرواسب الجليدية فى العينات الأسطوانية البحرية أن العصور الجليدية وبين الجليدية قد تبادلت لمدة 3 مليون سنة تقريبا . وقد مثل تحديد أسباب تلك العصور تحديا أساسيا لتقديم نظرية شاملة عن المناخ القديم . وقد قدم الجيولوجى الاسكتلندى جون كرول John Croll أول تفسير لتلك الظاهرة فى منتصف القرن التاسع عشر، ثم طورها الفلكى الصربى (اليوغوسلافى سابقا) ميلوتين ميلانكوفيتش Milton Milankovitch فى بداية القرن العشرين .

فقد أدرك كل من كرول وميلانكوفيتش أن التغيرات الصغيرة فى مدار الأرض حول الشمس وفى ميل محور دوران الأرض على هذا المدار وفى ترنح (تمايل) wobble الأرض قليلا حول محور دورانها قد تؤدى إلى حدوث تغيرات طفيفة ولكن مهمة فى كمية الطاقة المشعّة التى تصل إلى أى خط عرض على سطح الأرض .

وقد أظهر إعادة ترتيب وتحديد عمر التغيرات المناخية خلال العصر الرابع أن التقلبات المناخية خلال الدورات الجليدية وبين الجليدية تقابل بدرجة كبيرة التغيرات الدورية فى مدار الأرض ، وفى ميل محور الأرض . ويعضد هذا الدليل أن التغيرات الفلكية التى تحدد توزيع الأشعة التى تصل إلى سطح الأرض تتحكم فى توقيت الدورات الجليدية وبين الجليدية .

ج . تركيب الغلاف الجوى

على الرغم من أن التغيرات فى مدار الأرض واتجاه محورها وترنحها تفسر توقيت الدورات الجليدية وبين الجليدية ، إلا أن التغيرات فى الطاقة الإشعاعية للشمس التى تصل إلى سطح الأرض تكون صغيرة جداً لتسبب وتشرح التغير فى متوسط درجات الحرارة (من 4 إلى 10° مئوية على الكرة الأرضية ، والتى تقتضيها ضمنا الشواهد الجيولوجية والبيولوجية. ولذلك، فإن هناك عوامل أخرى يجب أن تؤخذ فى الاعتبار ، منها الانخفاض الطفيف فى درجات الحرارة والناتج عن التغيرات المدارية ، والذى يجب أن يترجم إلى تغير فى درجة الحرارة يكفى لنشأة وحفظ الفرش الجليدية الضخمة فى حين البليستوسين . ولا نعرف بالضبط كيف تم ذلك ، ولكن من المرجح أن بعض هذه العوامل تتضمن التغير فى التركيب الكيميائى وتغير نسبة الغبار dustiness فى الغلاف الجوى والتغير فى انعكاس الأشعة من سطح الأرض .

وتعتبر فقاعات الهواء فى جليد المثلجة فى الفرش الجليدية ، والموجودة حاليا فى أنتاركتيكا وجرينلاند ، أنها عينات من الغلاف الجوى القديم . وتدل دراسة التركيب الكيمائى للهواء المحبوس ، والذى يرجع تاريخه إلى أحدث عصر جليدى ، أن الغلاف الجوى

أثناء التثلج احتوى على نسبة أقل من ثانى أكسيد الكربون والميثان عما هو عليه الآن . ويعرف هذان الغازان المهمان من بين غازات الدفيئة greenhouse gases (الدفيئة بيت زجاجى لزراعة النباتات) . فعندما تكون نسبتهما عالية فى الغلاف الجوى ، فإنهما يسببان حبس الطاقة الإشعاعية المنبعثة من سطح الأرض . والتى تهرب إلى الفضاء فى الأحوال الأخرى. ونتيجة لذلك ، ترتفع درجة حرارة الغلاف الجوى السفلى ، ويصبح مناخ الأرض أكثر دفئاً . أما إذا كان تركيز غاز ثانى أكسيد الكربون والميثان منخفضاً ، كما كان الحال أثناء الأزمنة الجليدية، فإن درجة حرارة هواء سطح الأرض تنخفض . ويُعتقد أن المستويات المنخفضة لهذين الغازين المهمين فى الغلاف الأرضى خلال الأزمنة الجليدية قد سببا انخفاضا فى درجة الحرارة خلال العصور الجليدية بمقدار النصف تقريباً. ولذلك تلعب غازات الدفيئة دوراً مهمًّا فى شرح كمية التغير فى درجة حرارة الأرض فى الماضى . وبالرغم من معرفتنا أن نسبة هذين الغازين قد انخفضت خلال الأزمنة الجليدية ، إلا أننا لا نعرف على وجه التأكيد ما سبب هذا الانخفاض .

وقد أوضحت دراسة العينات الأسطوانية فى الجليد أن كمية الغبار كان مرتفعة خلال العصور الجليدية . وقد حملت الرياح القوية الغبار الدقيق عند هبوبها عبر رسوبيات الاكتساح المتكونة فى مجارى المياه التى تنساب من حافة المثلجة عند انصهارها ، والأحواض الصحراوية الجافة . وقد أدت كمية الغبار العالقة فى الغلاف الجوى لأن تكون السماء غائمة معظم الوقت . ويؤدى غبار الغلاف الجوى الدقيق إلى تفرق الأشعة المرسلة إلى سطح الأرض فى الفضاء ، مما يؤدى أيضا إلى زيادة تبريد سطح الأرض . وعندما تدخل الأرض فى العصر الجليدى ، فإن مساحات كبيرة من سطح الأرض تتغطى باستمرار بالثلج وجليد المثالج . وتفرق أسطح انعكاس الثلج والجليد الأشعة إلى الفضاء ، مما يؤدى إلى زيادة تبريد الغلاف الجوى السفلى . ويؤدى ذلك ، بالإضافة إلى النسبة المنخفضة لغازات الدفيئة وزيادة غبار الغلاف الجوى إلى زيادة واتساع المثالج وامتدادها .

د. التغيرات فى دوران المحيطات

يلعب دوران ماء المحيط دورا مهمًّا فى مناخ الكرة الأرضية . فعندما يتبخر سطح الماء الدافئ المتحرك شمالا فى شمال المحيط الأطلنطى ، فإن ملوحة الماء المتبقى تزداد ويصبح الماء أكثر برودة . ويكون الماء المالح البارد أكثر كثافة ويغوص بعمق فى المحيط. وتحافظ الحرارة المنبعثة إلى الغلاف الجوى نتيجة تبخر الماء ، على أن يكون المناخ معتدلا نسبياً فى شمال غرب أوروبا . ولننظر ماذا يحدث إذا توقف هذا الدوران؟

وعموما ، فإن معدل دوران مياه المحيط العميق يكون حساساً لملوحة ماء السطح فى المواقع التى يتكون فيها الماء عالى الكثافة . وقد أوضحت الدراسات أنه خلال أزمنة انخفاض الملوحة ، فإن حركة دوران مياه المحيط العميقة تنخفض . ولذلك فإنه يمكن افتراض أنه عندما تقل الطاقة الإشعاعية عند بداية التثلج ، فإن المحيط والغلاف الجوى يبرد عند خطوط العرض العليا (بالقرب من المناطق القطبية) مما يؤدى إلى انخفاض التبخر وزيادة اتساع جليد البحر . وتؤدى عذوبة المياه السطحية عند خطوط العرض العليا إلى وقف تكون ماء مالح عالى الكثافة ، ولذلك يتوقف نظام الدوران الرأسى لمياه المحيط . ويؤدى انخفاض التبخر عند خطوط العرض العليا إلى انخفاض ملحوظ فى انطلاق الحرارة إلى الغلاف الجوى ، ولذلك تبقى كتل الهواء البارد المتحركة فى اتجاه الشرق عبر شمال الأطلنطى . وتؤدى زيادة البرودة نتيجة الغطاء الجليدى فى البحر الممتد فى شمال الأطلنطى والفرش

الجليدية النامية فوق القارات ، إلى أن يزداد مناخ أوروبا برودة ، مما يؤدى فى النهاية إلى تكون أرض دائمة التجمد طوال السنة (تربة الصقيع الدائم permafrost) ، فى نطاق كبير خلف حدود الفريشة الجليدية . وهكذا ، فإن التغير فى نظام دوران المحيط يؤدى إلى زيادة التأثير المناخى المحدود نسبيا ، والذى يرجع إلى التغيرات الفلكية . وعلاوة على ذلك ، فإنه يساعد فى تفسير مناخ الكرة الأرضية المتقلب بين حالتين مستقرتين نسبيا - واحدة يعمل خلالها نظام دوران المحيط (خلال الأزمنة بين الجليدية) وأخرى يتوقف فيها هذا النظام (خلال أزمنة التثلج) .

الملخص

1. المثالج أجسام دائمة من جليد متحرك تتكون فى معظمها من ثلج أعيد تبلوره .
2. تصنف المثالج بناءً على شكلها وحجمها إلى قسمين رئيسيين هما المثالج الجبلية والقلنسوات الجليدية (مثالج الوادى ومثالج بيدمنت ومثالج الدارة ومثالج فيورد وقلنسوات جليدية) والثانى هو المثالج القارية والرفوف الجليدية.
3. يكون الجليد فى المثلجة معتدلة الحرارة عند نقطة الانصهار الجليدى ، حيث يوجد الماء السائل عند قاعدة المثلجة ، بينما يكون الجليد فى المثلجة القطبية تحت نقطة الانصهار الجليدى ويصبح متجمداً كصخر تستقر عليه المثلجة.
4. تتكون المثالج فقط عند خط الجليد أو فوقه ، والذى يكون بالقرب من مستوى سطح البحر فى المناطق القطبية ويكون عند ارتفاعات عالية من المناطق المدارية .
5. يزداد الجليد فى السمك نتيجة تراكم الثلج ، أما عند قمم الجبال التى تنحدر منها مثالج الوادى أو عند المراكز المحدبة للفريشة الجليدية ، حيث يصبح الجليد سميكا للدرجة التى يبدأ فيها فى الانحدار . وخلال فترات المناخ المستقر ، يبقى حجم المثلجة ثابتا بسبب أن المثلجة تستعوض خلال تراكم الجليد ، ذلك المفقود منها بالانصهار والتسامى والانفصال الجليدى فى نطاق النفاد . وعموما ، فإن المثلجة تنكمش خلال الفترات الدافئة نتيجة زيادة عملية النفاد عن التراكم ، وبالعكس تمتد المثلجة عندما يزيد التراكم عن النفاد فى المناخ البارد.
6. تتحرك المثالج نتيجة عمليتى الانسياب الداخلى اللدن فى المناطق الباردة جداً والانزلاق القاعدى فى المناخات الأكثر دفئاً.
7. تقوم المثالج بتعرية الصخور بعمليات الاقتلاع والسحج . ويشمل الركام الصخرى المنقول عند قاعدة وجوانب المثلجة كسرات تتراوح بين حجم دقيق صخرى ناعم إلى جلاميد كبيرة.
8. تقوم المثالج الجبلية بتعرية وديان المجارى المائية إلى وديان متثلجة لها بروفيل يشبه الحرف U مع وجود دارات (حفر عميقة مستديرة) عند قمم هذه الوديان. وتُحفر الفيوردات تحت مستوى سطح البحر بالمثالج فى المناطق الساحلية عند خطوط العرض العليا.
9. المنجرفات المثلجية هى رواسب ترسبت بالمثالج والمياه الناتجة عن انصهارها. ويترسب الحريث (تل) مباشرة من المثالج ، بينما تترسب المنجرفات المثلجية البحرية على قاع المحيط من جليد المثالج الطافى. وتضم المنجرفات المتطبقة رواسب الاكتساح المترسبة بمجارى المياه المنصهرة . وتسمى المنجرفات التى حملها الجليد ثم تراكمت بعد انصهاره بالركام الجليدى (مورين) .

10. تناوبت العصور الجليدية مع العصور بين الجليدية والتى قاربت درجات الحرارة فيها درجات الحرارة الموجودة اليوم . وتدل دراسات العينات الاسطوانية البحرية أن أكثر من 20 دورة جليدية ـ بين جليدية قد حدثت خلال حين البليستوسين .

11. قد ترتبط العصور الجليدية فى تاريخ الأرض بأوضاع القارات وأحواض المحيطات التى نتجت من حركات ألواح الغلاف الصخرى . ويبدو أن تغيرات فى مدار الأرض حول الشمس وفى ميل محور دوران الأرض على هذا المدار ترتبط وتتحكم فى توقيت الدورات الجليدية ـ بين الجليدية ، وتؤثر كذلك فى توزيع الطاقة الإشعاعية للشمس التى يستقبلها سطح الأرض . وقد يساعد التغير فى تركيز ثانى أكسيد الكربون والميثان والأتربة فى الغلاف الجوى فى شرح الانخفاض فى درجة حرارة الأرض خلال العصور الجيولوجية ، بينما قد يساعد التغير فى دوران المحيط فى شرح التغيرات بين الحالات الجليدية والجليدية المستقرة لنظام المناخ .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.museum.state.il.us/exhibits/ice_ages/
http://www-nsidc.colorado.edu/
http://www.ec.gc.ca/climate/index.html
http://www-nsidc.colorado.edu/NSIDC/gallery.html
http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/paleo.html
http://www.museum.state.il.us/exhibits/larson/

المصطلحات المهمة

ablation	نفاد	ice cap	قلنسوة جليدية (ج.قلانس)
accumulation	التراكم	ice sheet	(فريشة جليدية) غطاء جليدى
arête	حيد المثلجة	ice shelf	رف جليدى
basal slip	انزلاق قاعدى	moraine	ركام جليدى(مورين)
calving	انفصال جليدى	outwash	رواسب اكتساح
cirque	دارة الجليد	piedmont glacier	مثلجة بيدمنت
continental glacier	مثلجة قارية	permafrost	تربة الصقيع الدائم
crevasse	شق جليدى	plastic flow	انسياب لدن
drift (=glacial drift)	منجرفات مثلجية	plucking	اقتلاع
drumlin	تل جليدى	polar glacier	مثلجة قطبية
erratics	جلاميد منقولة	pressure melting point	نقطة الانصهار الضغطى
firn	ثلج جليدى	rock flour	دقيق صخرى
fjord	فيورد (ج.فيوردات)	snow	ثلج
glacial drift	منجرفات مثلجية	snow line	خط الثلج
glacial wash	غسل مثلجة	striation,glacial	حز جليدى (ج. حزوز)
glaciation	تثلج	sublimation	تسامى
glacier	مثلجة (ج. مثالج)	temperate glacier	مثلجة معتدلة الحرارة
hanging valley	وادٍ معلق	till	حريث
horn	قرن جليدى	tillite	صخر الحريث
ice	جليد	U-shaped valley	وادٍ مشابه لحرف U
iceberg	جبل جليد	valley glacier	مثلجة الوادى
		varve clay	صلصال رقائقى حولى

الأسئلة

1. كيف يمكن التمييز بين مثالج الوادى والمثالج القارية ؟
2. ما خط الثلج ؟ وما علاقة المثالج بهذا الخط ؟
3. اذكر خطوات تحول الثلج إلى جليد مثلجة .
4. اذكر الطرق التى تؤثر بها درجة حرارة الجليد على طريقة حركة المثلجة .
5. اشرح كيف يمكن استخدام معالم التعرية فى الاستدلال على اتجاهات انسياب المثالج السابقة .
6. اذكر ثلاثة أنواع من الرواسب المتثلجة .
7. كيف يمكن التمييز بين الحريث ومنجرف متطبق عند فحص مكاشف تلك الرواسب؟
8. تحتوى بعض أجزاء المثلجة على كثير من الرواسب ، بينما تحتوى بعض الأجزاء الأخرى على القليل جدا من الرواسب . ما السبب ؟
9. اذكر الكيفية والمقدار التقريبى الذى يرتفع وينخفض به مستوى سطح البحر خلال الدورات الجليدية - بين الجليدية .
10. ما التغيرات فى مدار الكرة الأرضية التى تؤثر على المناخ ؟
11. ما الدليل الذى تم الحصول عليه من العينات الأسطوانية فى الرواسب البحرية العميقة والذى يدل على أن الدورات الجليدية - بين الجليدية قد تكرر حدوثها خلال حين البليستوسين؟
12. قارن بين أنواع الحريث التى يمكن توقعها فى منطقتين متثلجتين ، يوجد بإحداهما صخور جرانيتية وصخور متحولة ، ويوجد بالمنطقة الأخرى طفل ناعم ورمال مترسبة ومفككة .

الفصل 15

الرياح والصحارى

I. العمل الجيولوجى للرياح

أ – نظام الرياح على كوكب الأرض

1. نمط الرياح على سطح الأرض
2. أحزمة الرياح
3. تأثير كريولى
4. تأثير السلاسل الجبلية

ب – حركة الرواسب بالرياح

1. نقل الرمال بالرياح
2. نقل التراب بالرياح

جـ – التعرية بالرياح

1. التذرية
2. سفع الرمال

د – الترسيب بالرياح (الرواسب الريحية)

1. الكثبان الرملية
2. بحار الرمال
3. لويس: الأتربة المتساقطة
4. الرماد البركانى

II. الصحارى

أ – مناطق تواجد الصحارى

ب – مناخ الصحراء

جـ – التجوية فى الصحراء

1. المجارى المائية عامل تعرية مهم فى الصحارى

د – الرواسب والترسيب فى الصحارى

III. معالم الأرض فى الصحارى

أ - المراوح الفيضية (الطميية) والبجادا (المنحدرات الطميية)

ب - البيدمنت (السفوح الجبلية)

جـ - الجبال المنعزلة (الجزيرية)

د - الميسات (الربوات) والبيوتات (التلال النضيدية)

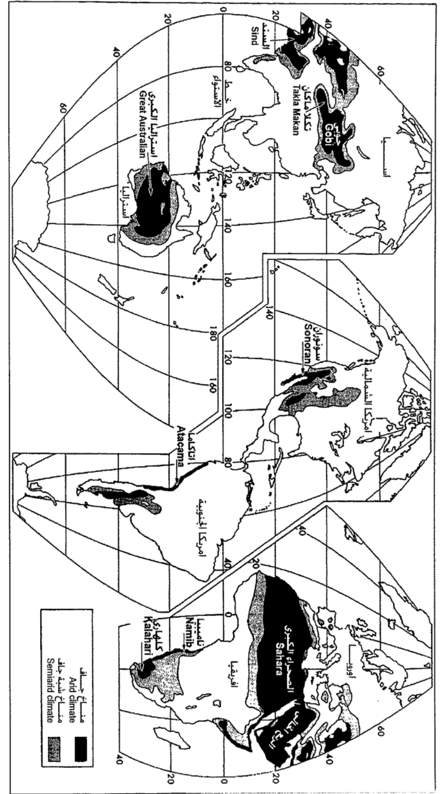
IV. التصحر

تغطى المناطق الصحراوية الحارة حوالى 42 مليـون كيلومتر مربع من سطح الأرض، وهو ما يمثل مايزيـد عن 30 ٪ من المساحة الكلية لسطح الأرض . وتـشمل معظم هذه المناطق ، والتى تتميز بنقص المياه ، نـوعين من المناخ هما المنـاخ الجـاف arid والمنـاخ شـبه الجـاف semiarid. ويشترك المناخان فى عديد من الخصائص. فالمناخ شبه الجاف يكون أعلى فى نسبة الرطوبة ، كما أنـه يمثل منطقة انتقالية بين المناطق الجافة والمناطق الرطبة ، ويتميـز بنمـو الحـشائش . ويـسمى الجغرافيـون تلـك المناطق شبه المدارية بالاستبس steppes أو الـبرارى . وتكون معظم المناطق الجافة عبارة عن صحارى أو شبه صحارى ، وتقع فى المناطق المدارية وشـبه المداريـة بـين خطى عرض 20° و 30° شمالاً وجنوباً تقريبـا (شـكل 1.15). وتنمو فى تلك المناطق الصحراوية الجافة بعض أنواع النباتات التى تتميز بقـدرتها عـلى تحمـل الجفـاف وزيادة الأملاح ، كـما تنمـو لهـا جـذور عميقـة تمتـد فى التربة لتحتفظ بالماء ، وتكون غالبا متباعدة عن بعـضها (شكل 2.15) . وتكون أوراق هـذه النباتـات صـغيرة جدا حتى تقلل من فقد الماء أثناء عملية النتح .

وتتميـز المنـاطق الـصحراوية الحـارة بـشدة تـأثير الرياح، التى تكون شديدة أحيانا بـما يكفـى لأن تجعـل حبيبات الرمل تدور فى الهواء ، كما نلاحظ أثنـاء الـسفر عـلى الطـرق الـصحراوية بمـصر وبمنطقتنـا العربيـة عموماً. إلا أن تأثير الرياح يمتد أيضا إلى سـائر منـاطق العالم خاصة الساحلية منها . فقد تعرضت مدينة لنـدن فى 25 يناير 1995م لعاصفة ريحية وصلت سرعتهـا إلى أكثر من 175 كم/ الساعة ، على الرغم من ندرة تعرض لندن لمثل تلك العواصف.

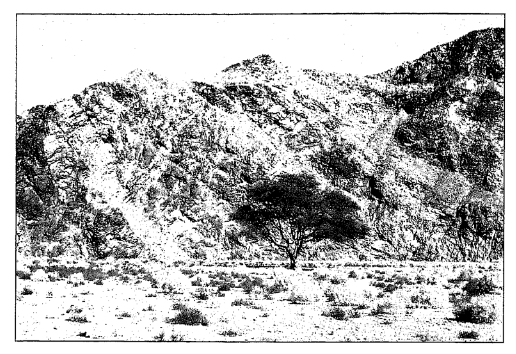
وتمثل الرياح قوة فعالة فى تـشكيل سـطح الأرض ، خاصة فى الصحارى الحارة ، رغم أنها تعتبر أقل عوامل التعرية تـأثيراً فى المنـاطق الرطبـة . ويمكـن أن يـستمر هبوب الرياح لعـدة أيـام متـصلة دون انقطـاع تقريبـاً. فالرياح هى عامل التعرية الرئيسى فى الـصحارى. كـما تعتبر عامل ترسيب رئيـسيًّا أيـضاً ، حيـث تقـوم بنقـل كميات ضخمة من الرمال والغرين والـتراب لمسافات طويلـة عـلى القـارات وفى المحيطـات . ويـستخدم الجيولوجيـون مـصطلح ريحـى eolian لوصـف العمليات الجيولوجية التى تقـوم فيهـا الريـاح بالـدور الرئيسى ، حيث يـشتق هـذا المصطلح مـن إلـه الـريح إليوس Aeolus عند اليونانيين القدامى . وتشبه الرياح المياه فى قدرتها على التعرية والنقـل والترسـيب ، حيـث تخضع حركة الغازات للقوانين نفسها التى تحكم حركة السوائل . ومع ذلك ، فهناك بعض الفروق التى تجعـل قوة الرياح أقل تأثيراً من تيارات المياه .

وسنتناول فى هذا الفصل عمـل الريـاح ، بالإضـافة للصحارى الموجودة على الكرة الأرضية ، حيث تـرتبط الكثـير مـن العمليـات الجيولوجيـة كالتعريـة والنقـل والترسيب فى الصحارى بعمل الرياح ، علاوة عـلى أن الصحارى تغطى معظم العالم العربى . وعلى الرغم من أن تأثير الرياح يكون أكثر أهمية فى المناطق الصحراوية ، إلا أنه لا ينحصر فى تلك المناطق فقـط . فتـؤثر الريـاح على عديد من الـشواطئ حيـث تحمـل الريـاح الرمـال المفككـة مـن الـشاطئ لتنقلهـا إلى المنـاطق الداخليـة . وسنعرض فى نهاية هذا الفصل لعملية التـصحر والتـى تسبب عديدًا من المشكلات الاقتصادية لبعض البلاد ، خاصة فى عالمنا العربى .



شكل (1.15): توزيع المناخات الجافة وشبه الجافة في العالم ، والتي تقع بين خطي عرض 20° و 30° شمالا وجنوبا تقريبا والصحارى الكبرى المصاحبة لها . تشمل المساحات الجافة جدا في المناطق القطبية مساحات تعرف بالصحارى القطبية polar deserts .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York(.



شكل (2.15): بعض أنواع النباتات فى وادى غدير بجنوب الصحراء الشرقية - مصر ، وتتميز بقدرتها على تحمل الجفاف وزيادة نسبة الأملاح ، وتكون متباعدة عن بعضها . لاحظ أن النباتات تعانى من الجفاف . (أ.د. ممدوح عبد الغفور ، هيئة المواد النووية).

ا - العمل الجيولوجى للرياح

يتكون الغلاف الجوى من خليط من الغازات التى نطلق عليها جميعا اسم الهواء air . أما الرياح winds فهى انسياب الهواء موازيًّا لسطح الكرة الأرضية دائمة الدوران. ويكون الغلاف الجوى فى حركة دائمة ، حيث نشعر بهذا عند هبوب نسمة لطيفة أو ريح قوية. وعلى الرغم من أن الرياح تحكمها كل قوانين انسياب السوائل التى تطبق على انسياب الماء فى المجارى المائية ، إلا أنه توجد بعض الاختلافات بينهما . فالرياح لا يحكمها عموماً حدود صلبة تمنع تدفق الهواء خلالها ، ما عدا سطح الأرض والوديان الضيقة ، عكس الماء المنساب فى مجارى الأنهار ، كما يتحرك الهواء فى كل الاتجاهات ، بما فى ذلك الحركة الرأسية فى الغلاف الجوى .

أ - نظام الرياح على كوكب الأرض

لكى نشرح لماذا تكون الرياح مؤثرة كعوامل جيولوجية فى بعض المناطق دون غيرها ، فإننا نحتاج لمناقشة كيف ترتبط الرياح على سطح الأرض بالحركة الدائمة للغلاف الجوى على كوكب الأرض . ويكون انسياب الهواء على سطح الأرض انسيابا مضطربًا turbulent أى فى مسارات غير منتظمة ، كما هو الحال فى انسياب الماء فى الأنهار . ويعتمد الانسياب المضطرب للسائل على ثلاثة خصائص للسائل وهى: كثافته ولزوجته وسرعته. وتسبب كثافة ولزوجة الهواء، واللتان تكونان منخفضتان للغاية (0.001، و0.02 من كثافة ولزوجة الماء على التوالى) اضطرابه حتى عند النسيم الخفيف . ويوضح جدول (1.15) أنواع الرياح وسرعاتها وتأثيرها على سطح البحر ، كما هو متفق عليه عالميا.

ويزداد انسياب الهواء اضطرابا كلما زادت سرعة تحركه ، كما هو الحال فى الانسياب المضطرب للماء . فيحرك النسيم اللطيف الحشائش الطويلة بوضوح ، بينما ترفع الرياح العاصفة غطاء الرأس ، وتهز الزوبعة القوية سيارة متحركة . ويؤدى الانسياب المضطرب

جدول (1.15): وصف أنواع الرياح وسرعاتها وتأثيرها على سطح البحر

سرعة الرياح (كم/ ساعة)	الوصف	تأثير الرياح على سطح البحر
1	هادىء	سطح مرآة
19-1	نسيم خفيف إلى لطيف	تموج خفيف إلى أمواج صغيرة (مويجات)
49-20	نسيم متوسط إلى قوى	أمواج متوسطة إلى قوية
88-50	نوة معتدلة إلى شديدة	أمواج مرتفعة ، زبد (رغوة) ، رذاذ
117-89	نوة شديدة إلى عاصفة	أمواج شديدة الارتفاع ، بحر ساحب
117	إعصار	بحر ذو لون أبيض ، زبد برغوة ورذاذ ، رؤية منخفضة

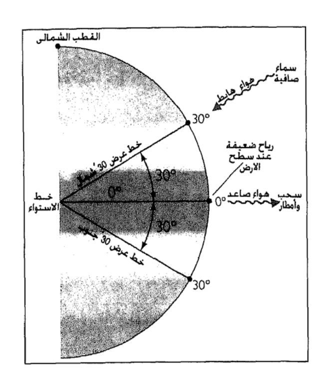
(After Press, F. and Siever, R. 1998: Understanding Earth, 2nd edition.W.H.Freeman and Company, New York).

أيضاً إلى تغيرات مفاجئة فى سرعة واتجاه الريح ، وقد تكون مثل هذه التغيرات قوية بدرجة تكفى لاهتزاز طائرة كبيرة .ويؤدى التغير فى الإشعاع الشمسى مع تغير خط العرض وتأثير كوريولى (انحراف اتجاه الرياح نتيجة دوران الأرض) وتوزيع القارات والمحيطات ومواقع السلاسل الجبلية إلى نشأة الرياح والتحكم فى اتجاهها وأحزمتها .

1 – نمط الرياح فوق سطح الكرة الأرضية

تعتبر الشمس المصدر الرئيسى لحرارة الغلاف الجوى وسطح الأرض . وتمتص كميات كبيرة من الإشعاع الشمسى عند حزام خط الاستواء المواجه للشمس ، والذى يمتد إلى خط عرض 30° شمالا وجنوباً (خط العرض latitude هو المسافة شمال أو جنوب خط الاستواء مقاسة بالزاوية التى يحددها نصف قطر الكرة الأرضية مع نصف القطر الاستوائى عند أى نقطة) ، (شكل 3.15). ويقع خط الاستواء عند خط عرض 0° بينما يقع القطب الشمالى عند خط عرض 90°. وتستقبل خطوط العرض القطبية كميات قليلة جدا من الطاقة الشمسية ، حيث تكون أشعة الشمس مائلة مما يؤدى إلى انتشارها على مساحة أكبر من سطح الأرض ، كما أن طول المسافة التى تقطعها تلك الأشعة فى الجو يجعل طاقتها محدودة أيضا. ويؤدى هذا التباين فى درجات الحرارة إلى أن تنتقل بعض الحرارة الزائدة عند الحزام الاستوائى الذى تحده خطوط عرض منخفضة ، إلى المناطق القطبية التى تحدها خطوط العرض العليا . وينساب الهواء البارد صوب خط الاستواء، بينما تتحرك الرياح الساخنة صوب الأقطاب ، لتنقل الكثير من الحرارة، خاصة المحمولة فى بخار الماء. وينعكس هذا الانتقال للطاقة غالبا فى صورة كتل الهواء المتحركة على شكل أعاصير شديدة .

وعندما تصعد كتلة الهواء الساخنة وتتمدد، فإنها تصبح أقل كثافة ، وذات ضغط منخفض ، وتسبب عملية التمدد برودة الهواء ، وهى عملية أدياباتية adiabatic process ، حيث تتغير درجات الحرارة دون فقد أى حرارة. ويرجع السبب فى ذلك، إلى أن كمية الحرارة الكلية تبقى ثابتة ، إلا أنها تنتشر خلال حجم أكبر من الهواء ، ولذلك تنخفض درجة حرارتها.



شكل (**3.15**): خط العرض latitude هـو المسافة شـمالا وجنـوب خط الاستواء مقاسة بالزاوية التى يحددها نصف قطر الكـرة الأرضـية مع نصف القطر الاستوائى . وعند خط الاستواء فإن السطح المعـرض للرياح يكون صغيرا ، ويرتفع الهواء مكونا سحبا تسقط كأمطار حيـنما تبرد. وعند خط عرض 30° شمالا وجنوبا يهبط الهـواء البـارد ويـصبح دافئا ، ويمتص الرطوبة وتصبح السماء صافية . وتؤدى هاتان الحركتان للهواء إلى دوران الهواء أفقيـا بـين خـط الاسـتواء وخطـوط العـرض الشمالية والجنوبية.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

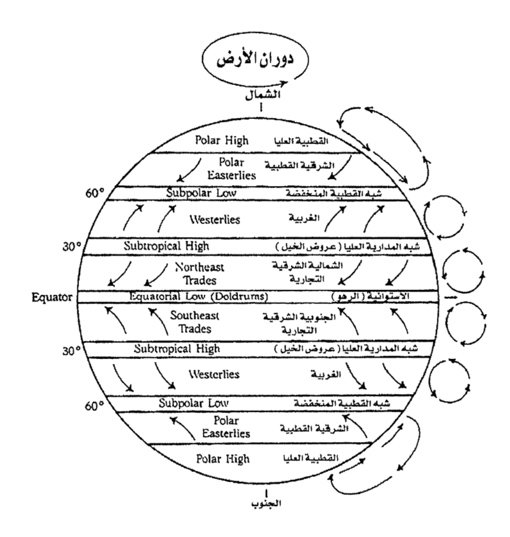
وعندما تهبط كتلة الهواء البارد المرتفعـة وتـنـضغط ، فإنها تصبح أكثـر كثافـة وترتفـع درجـة حرارتهـا أثنـاء الهبوط . ولا تتغير كمية الحرارة فى كتلة الهـواء الهابطـة، ولكن لأنها تنضغط فى حجم أصغر، فإن درجة الحرارة ترتفع ، وهـذه أيـضا عمليـة أدياباتيـة. وهكـذا تـؤدى التأثيرات الأدياباتية إلى تبريد كتل الهواء أثنـاء تمـددها، وارتفاع درجة حرارتها أثناء ضغطها.

ويـستجيب الغـلاف الجـوى بـسرعة للإشـعاع الشمسي، حيـث يـصعد الهـواء الـدافئ ويهـبط الهـواء البـارد. وتنـساب كتلـة الهـواء مـن الـضغط العـالى إلى الضغط المنخفض بحثا عن وضع الاتزان. ولكن تكون الحركة الرأسية للهـواء قليلـة، عنـد مقارنتهـا بالحركـة الأفقية (بمعنى نـشأة الريـاح). ويتـأثر انـسياب الهـواء بدرجة كبيرة بدوران الأرض وبتأثير كوريـولى ، الـذى سيتم مناقشته لاحقا .

2 – أحزمة الرياح

يرجع السبب فى تكون أحزمة الريـاح wind belts (شكل4.15) إلى الحركة الدائمة للغلاف الجوى بسبب التغير فى الإشعاع الشمسى مع تغير خطوط العـرض . فالشمس تعمل على تدفئة سطح الأرض الواقـع حـول خط الاستواء ، حيث تكـون أشـعة الـشمس عموديـة تقريباً على سطح الأرض ، بينما تعمل تلك الأشعة عـلى تدفئة سطح الأرض بدرجة أقل عند خطـوط العـرض العليا والأقطاب ، حيث تـسقط أشـعة الـشمس مائلـة بزاوية على سطح الأرض. وتصعد كتلة الهواء الـساخن عند خط الاستواء إلى أعلى وتتمدد ، وتصبح أقل كثافة من الهواء البارد عند خطوط العرض العليا والأقطاب. وتؤدى عمليـة التمـدد إلى بـرودة كتلـة الهـواء ، وهـى عملية أدياباتية كما ذكرنا سابقا. ويـسقط الهـواء محتـواه من الرطوبـة المتكثفـة عـلى هيئـة أمطـار فـوق المنطقـة الاستوائية.

وينتشر الهواء البارد الجاف الموجود فى طبقات الجـو العليا شمالا وجنوبا ، ليـصبح أكثـر انـضغاطا ، حيـث ينساب ناحية خطوط العرض الأعـلى ذات المـساحات البينية الأصغر. وعند خط عـرض 30° شـمالا وجنوبـا تقريبا ، يهبط الهواء الأكثر كثافـة عنـد نطـاق الـضغط العالى شبه المدارى semitropical high pressure zone، مما يؤدى إلى ارتفاع حرارة الهواء أدياباتيـا أثنـاء هبوطه وعودته إلى سـطح الأرض ككتلـة هـواء جافـة دافئة . وينـساب بعـض الهـواء الهـابط ناحيـة القطبـين كرياح تهب من الغرب ، ولذلك تعرف بالرياح الغربيـة



شكل (**4.15**): نمط نموذجى للرياح فوق سطح الكرة الأرضية دون تأثير للكتل الأرضية أو ميل محور دوران الأرض .
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

أو غربيات westerlies ، بينما ينساب جزء من الهواء ناحية خط الاستواء كرياح تجارية تهب من الشرق (شكل 4.15). وقد يطلق مصطلح الرياح التجارية على تلك الرياح لدورها الهام فى دفع السفن التجارية عبر المحيطات المدارية فى الأوقات التى كانت فيها الرياح هى المصدر الرئيسى للقوى المحركة .

وتكون نسبة الرطوبة منخفضة فى الهواء الدافئ المنساب من النطاق شبه المدارى كرياح تجارية ، ولذلك يكون من النادر تساقط الأمطار فى تلك المناطق . وتكون الرياح الدافئة الجافة فى الأحزمة شبه المدارية subtropical belts بين خطى عرض 30° و 20° شمالا وجنوبا ، مسئولة عن وجود عديد من الصحارى الكبرى فى العالم ، مثل الصحراء الكبرى فى شمال أفريقيا ، وكلهارى فى أفريقيا ، وسونوران فى غرب أمريكا الشمالية واستراليا الكبرى والجزيرة العربية .

وينساب الهواء البارد فوق الأرض من كلا القطبين (شكل 4.15). وعندما تنساب كتل الهواء من الشرق ناحية خط الاستواء (الرياح الشرقية القطبية)، فإنها تنساب عبر مساحات أكبر بين خطوط العرض، وتصطدم عند خطى عرض 60° شمالا وجنوبا تقريبا بكتل الرياح الغربية، وتصعد الكتلتان عند النطاق شبه القطبى المنخفض low subpolar.

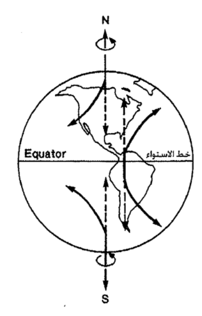
ويتغير نمط الرياح فوق سطح الأرض نتيجة وجود الكتل القارية، والتى تشمل سلاسل الجبال، بالإضافة إلى التسخين والتبريد الموسميين، واللذين يؤثران على نصفى الكرة الشمالى والجنوبى.

3 - تأثير كوريولى

يتأثر النمط البسيط لدوران الهواء بين خط الاستواء والأقطاب بدوران الكرة الأرضية، مما يسبب انحراف أى جسم متحرك (تيار هواء أو ماء) إلى يمين اتجاه الحركة فى نصف الكرة الأرضية الشمالى وإلى يسار اتجاه الحركة فى نصف الكرة الجنوبى. ويسمى هذا التأثير على اتجاه الهواء فوق سطح الأرض تأثير كوريولى Coriolis effect، نسبة إلى مكتشفه عالم الرياضيات الفرنسى جاسبار كوريولى Gaspard Coriolis فى القرن التاسع عشر.

ويتغير تأثير كوريولى بتغير خط العرض وسرعة الجسم المتحرك. ويرجع تأثير خط العرض إلى تغير السرعة الزاوية angular velocity، وهى السرعة الناتجة عن دوران الأرض، والتى تكون أقل ما يمكن عند خط الاستواء وأكبر ما يمكن عند الأقطاب. وبذلك يكون تأثير كوريولى أقصى ما يمكن عند الأقطاب، ويصل إلى الصفر عند خط الاستواء.

وتسمى العجلة الزاوية angular acceleration التى يحتاجها جسم متحرك لكى يبقى فى مساره ولا يتأثر بدوران الأرض بعجلة كوريولى. ونظرا لغياب هذه العجلة الزاوية أو عدم كفايتها، فيحدث انحراف فى مسار الجسم المتحرك إلى يمين اتجاه الحركة فى نصف الكرة الأرضية الشمالى، وإلى يسار اتجاه الحركة فى نصف الكرة الأرضى الجنوبى (شكل 5.15)، والذى يسمى كما سبق أن ذكرنا بتأثير كوريولى.



شكل (5.15): تأثير كوريولى Corioli's effect، والذى يشرح كيف يحدث انحراف فى مسار كتل الهواء أو مياه المحيطات المتحركة، إلى يمين اتجاه الحركة فى نصف الكرة الشمالى، وإلى يسار اتجاه الحركة فى نصف الكرة الأرضية الجنوبى.
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ويؤدى تأثير كوريولى على دوران الغلاف الجوى إلى انحراف كل من انسيابات الهواء الشمالية والجنوبية والباردة والساخنة. فعلى سبيل المثال، عند ما تهب رياح سطحية ناحية الجنوب فى الحزام الاستوائى الساخن فى نصف الكرة الشمالى، فإن الرياح تنحرف إلى اليمين، وتهب حينئذ من الشمال الشرقى بدلا من الشمال. وهذه هى الرياح التجارية الشمالية. وبالمثل، فإن الرياح الغربية فى نصف الكرة الشمالى، هى فى الأصل رياح متجهة ناحية الشمال، وانحرفت ناحية

اليمين وأصبحت بذلك تهب من الجنوب الغربى . أما بالقرب من خط الاستواء ، فإن الهواء يصعد لأعلى ، وبذلك تكون هناك رياح قليلة عند سطح الأرض ويبرد الهواء أثناء صعوده ، مما يتسبب فى تواجد السحب والأمطار الغزيرة عند المناطق الاستوائية .

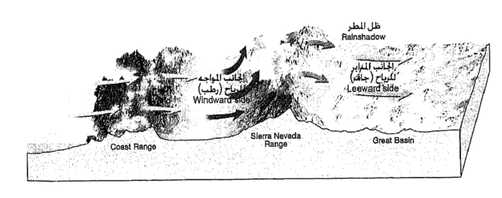
4 - تأثير السلاسل الجبلية

بالإضافة إلى المناطق التى تقع فيها الصحارى بين خطى عرض 20° و 30° شمالا وجنوبا تقريبا ، فإن بعض الصحارى الأخرى تقع خلف سلاسل الجبال العالية (شكل 6.15)، والتى تعترض الهواء المحمل بالرطوبة . وعندما يجبر الهواء على أن يرتفع فوق سلسلة الجبال ، فإنه يتمدد ويبرد ويسقط حمولته من الرطوبة على هيئة أمطار على جانب الجبال المواجه للريح . ويتم هنا أيضا تسخين الهواء الهابط بالضغط . ويؤدى الهواء الجاف الذى يصل إلى الجانب المدابر lee side لسلسلة الجبال إلى نشأة مناخ جاف فوق المنطقة خلف سلسلة الجبال ، حيث تعرف تلك المنطقة بصحراء ظل المطر **rainshadow desert**. ومن الأمثلة الجيدة على وجود مناطق جافة فى ظل المطر أجزاء من الصحراء جنوب غرب الولايات المتحدة فى نيفاذا وشمال أريزونا ، والتى تقع فى ظل المطر لسلسلة جبال سيرا نيفادا شرق كاليفورنيا وصحراء وسط آسيا.

ب - حركة الرواسب بالرياح

تُحدث الأعاصير والتيفونات (الأعاصير المدارية) **typhoons** دمارا هائلا بسبب سرعة الرياح التى تصل عندئذ إلى حوالى 120 كم/ الساعة ، وقد تزيد لتصل إلى 500 كم/ الساعة. وتكون قوة الرياح كبيرة لدرجة أنها تقتلع الأشجار من جذورها وتهدّم المنازل ، وتقذف الأجسام الكبيرة الحجم إلى مسافات بعيدة . ولحسن الحظ ، فإن رياح الأعاصير استثنائية ، ولكنها على الرغم من خطورتها فإنها تقدم صورة لقوة الرياح كعامل جيولوجى .

ولا يستطيع الهواء أن ينقل حبيبات كبيرة مثل تلك التى ينقلها الماء عند السرعة نفسها، نظرا لأن كثافة الهواء عند مستوى سطح البحر أقل بكثير جدا من كثافة الماء كما ذكرنا . ولكن عندما تزيد سرعة الرياح عن 300



شكل (6.15): تقع بعض الصحارى عند خطوط العرض الوسطى خلف السلاسل الجبلية العالية ، وتعرف بصحارى ظل المطر rainshadow deserts . فعندما يقابل الهواء المتحرك حاجزا جبليا ، فإنه يجبر على أن يرتفع لأعلى ويتساقط المطر غالبا على الجانب المواجه للرياح windward side . ويكون الهواء الهابط على الجانب المدابر للرياح leeward side أكثر جفافا ، وتعرف تلك المنطقة بصحراء ظل المطر.

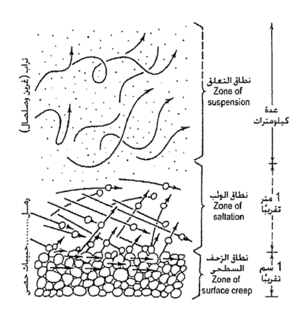
(After.Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

كم/ الساعة ، فإنها تستطيع حمل حبيبات من الصخر يصل قطرها إلى عدة سنتيمترات إلى ارتفاعات قد تصل إلى متر أو أكثر . ولكن نادراً ماتزيد سرعة الرياح فى معظم المناطق عن 50 كم/ الساعة. وتستطيع تلك الرياح القوية أن تحمل حبيبات الرمل التى تتعلق فى الهواء ، بينما تهبط الحبيبات الأكبر حجما بسرعة ولا تبقى معلقة فى الهواء . وعندما تكون سرعة الهواء أقل ، تنتقل حبيبات الرمل بالقرب من سطح الأرض ، بينما يتحرك التراب dust فقط عالقا فى الهواء.

1 - نقل الرمال بالرياح

إذا هبت الرياح على طبقة من الرمل ، فإن حبيبات الرمل تبدأ فى التحرك عندما تكون سرعة الرياح أقل من 16 كم/ الساعة . وتسمى حركة دحرجة rolling حبيبات الرمل للأمام بالزحف السطحى surface creep (شكل 7.15). وترتفع حبيبات الرمل فى الهواء عندما تزداد سرعة الرياح ، حيث تنتقل حبيبات الرمل فى مسارات مقوسة لتترسب بعد مسافة قصيرة فى اتجاه الرياح ، وهذه هى عملية الوثب نفسها saltation التى ذكرت فى المجارى المائية ، حيث تتحرك حبيبات الرمل وتسير فى مسارات مقوسة أيضا بالقرب من قاع النهر.

- الوثب: ينقل مايقرب من 75 ٪ من الرمال فى المناطق المغطاة بالكثبان الرملية بالوثب **saltation.** وتدل قياسات معدل تحرك الرمال فى صحارى منطقة الشرق الأوسط على زيادة سرعة حركة الرمال مع زيادة سرعة الرياح . فقد تستطيع رياح قوية تهب بسرعة حوالى 58 كم/ الساعة نقل كمية من الرمال فى يوم واحد كتلك التى تنقلها رياح تهب بسرعة 29 كم/ الساعة فى ثلاثة أسابيع .

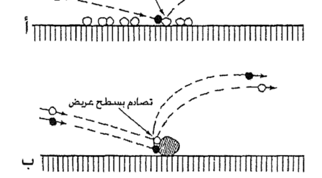


شكل (**7.15**): طريقة نقل الراسب بالرياح . تعرف حركة دحرجة حبيبات الرمل للأمام بالزحف السطحى **surface creep** . وترتفع حبيبات الرمل فى الهواء عندما تزداد سرعة الرياح ، وتنتقل الحبيبات فى مسارات مقوسة تهبط بعد مسافة قصيرة فى اتجاه الريح ، وتعرف تلك الطريقة بالوثب **saltation** . كما ترتفع الحبيبات الأدق حجما كالغرين **silt** والصلصال **clay** فى الهواء حيث تبقى معلقة لمسافات طويلة .

(After Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York).

فإذا كانت الرياح قوية بدرجه كافية ، فإنها تبدأ فى دحرجة حبيبات الرمل على سطح الأرض حيث تصطدم بحبيبة أخرى وتصطدم بها لتطير فى الهواء . وعندما تهبط الحبيبة الثانية إلى الأرض فإنها تصطدم بحبيبات أخرى وتقذف بها لتنساب فى الهواء . ويحتوى الهواء القريب من الأرض على كمية كبيرة من حبيبات الرمل الواثبة ، والتى تتحرك كلها فى اتجاه الريح فى مسارات على هيئة أقواس تشبه حركة كرات البنج بونج فوق منضدة اللعب (شكل 8.15أ) . وعموما لا يزيد الارتفاع الذى تصل إليه حبيبات الرمل عن متر

واحد حتى فى الرياح القوية . وقد تصطدم حبيبات الرمل بحبيبات حصى أو أى سطح عريض لتثب لأعلى بسرعة عالية ، وإلى ارتفاعات أكبر (شكل 8.15 ب) .



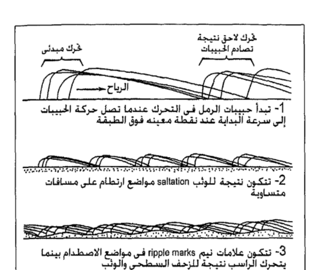
شكل (8.15): تحرك الرمال بالوثب saltation

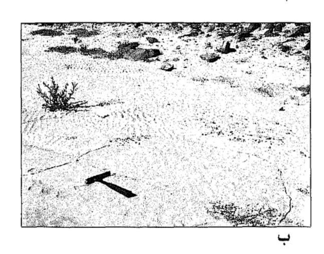
أ) تسبب الرياح القوية تحرك الرمال بالوثب ، حيث تصطدم بعض حبيبات الرمل والتى تثب بدورها وتتناثر فى الهواء فتحملها الرياح ، بينما تعمل الجاذبية الأرضية على إعادتها إلى سطح الأرض فتصطدم بحبيبات أخرى ، وتتكرر العملية .

ب) تصطدم حبيبات الرمل بحبيبات الحصى أو بأى أسطح عريضة وتثب لأعلى بسرعة عالية وإلى ارتفاع أكبر ، وتعتمد زاوية الصعود على درجة ميل سطح الاصطدام .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York(.

- نيم الرمال (مويجات الرمال): تكون تجمعات الرمل جيدة الفرز التى تتراكم على سطح الأرض غير ثابتة ، حتى تحت تأثير الرياح اللطيفة . وعندما تهب الرياح على هذا التجمع الرملى ، فإن حبيبات الرمل الأصغر تتحرك بالوثب ، بينما تبقى الحبيبات الأكبر حجماً مكانها (شكل 9.15 أ) . وعندما تصطدم الحبيبات المتحركة الأدق حجماً بسطح الأرض ، فإنها تحرك حبيبات دقيقة إضافية ، ويتكون تجمع آخر من الحبيبات الخشنة ، بينما تتحرك الحبيبات الدقيقة إلى الأمام ، وتكوّن الحبيبات الخشنة مجموعة من المرتفعات الطولية الصغيرة تسمى نيم الرمال (مويجات الرمال) sand ripples . وتميل مويجات الرمل إلى الاصطفاف فى نمط منتظم ، حيث تكون قمم هذه المويجات عمودية على اتجاه الريح (شكل 9.15 ب) . وتختفى المويجات عند هبوب رياح قوية ، حيث تتحرك كل الحبيبات وتقل عملية الفرز .



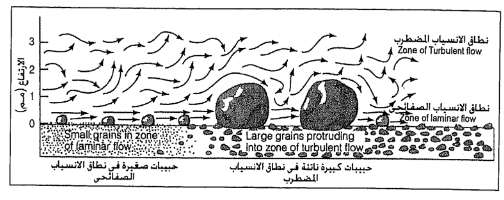


شكل (9.15): نيم الرمال ripples Sand

أ. تكوين نيم الرمال (مويجات الرمال) بالرياح

(After Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ب. نيم الرمال (مويجات الرمال) sand ripples ، حيث تصطف تلك المويجات فى نمط منتظم ، وتكون قممها عمودية على اتجاه الريح ، طريق قفط – القصير – الصحراء الشرقية .



شكل (**10.15**): تتواجد حبيبات الرمل الناعم والغرين عند سطح الأرض فى نطاق الانسياب الصفائحى للهواء zone of laminar flow ، والذى يقل سمكه عن 0.5 مم ، حيث تكون سرعة الريح بطيئة للغاية . ونتيجة لذلك فإنه من الصعب أن تزيح تلك الرياح تلك الحبيبات الصغيرة وتعريها . وعندما تنتؤ تلك الحبيبات أكثر فى نطاق يتميز بوجود هواء ذى سرعة أكبر ومضطرب ، فإنها تبدأ فى التحرك بسهولة.
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

2 - نقل التراب بالرياح

تنتقل حبيبات الرمل على سطح الأرض ببطء ، وتترسب بسرعة عندما تنخفض سرعة الريح ، بينما تنتقل حبيبات التراب dust الدقيقة (راسب فى حجم حبيبات الغرين والصلصال) بسرعة أكبر ولمسافات أطول بكثير ، قبل أن تهبط إلى سطح الأرض . وتصل كمية التراب المتكوْنة سنويا بهذه الطريقة على مستوى العالم إلى حوالى 5 بلايين طن. ومن المناطق التى تتكون فيها كميات كبيرة من التراب طبقات البحيرات والمجارى المائية الجافة والمراوح الطميية وسهول المجارى المائية الناتجة من المثالج والمناطق التى تغطيها رواسب من التراب ، والتى فقدت غطاءها النباتى بسبب تغيرات مناخية أو نشاط بشرى .

وتقل سرعة الهواء المتحرك بالقرب من سطح الأرض بدرجه كبيرة نتيجة الاحتكاك ، حيث تكون سرعة الهواء منخفضة للغاية . وتوجد طبقة من الهواء الساكن يقل ارتفاعها عن 0.5 مم فوق سطح الأرض مباشرة (شكل 10.15). وعندما تنتؤ حبيبات الرمل فوق طبقة الهواء الساكن هذه فإنها تطير عاليا بفعل الدوامات المضطربة المتصاعدة . وعلى العكس من ذلك، فإن حبيبات التراب تكون صغيرة الحجم ومرتبة بإحكام ، لدرجة أنها تكون سطحا ناعما جدا ، ولا تنتؤ حبيباته فوق طبقة الهواء الساكن . ولايمكن أن يتحرك هذا التراب حتى إذا هبت عليه رياح قوية ، إلا أنه يمكن تحريكه فقط بأن تصدم به حبيبات رمل وثابة أو أى أجسام أخرى .

وعندما تصعد حبيبات التراب فى الهواء ، فإنها تكوّن الحمولة المعلقة suspended load للرياح . وتقذف الدوامات حبيبات التراب إلى الأمام باستمرار، بينما تعمل الجاذبية الأرضية على جذبها ناحية الأرض (شكل 7.15) . وفى معظم الأحيان ، يترسب الراسب المعلق بالقرب من مكان نشأته ، إلا أن الرياح القوية المصاحبة للعواصف الترابية القوية تحمل التراب الدقيق جدا إلى طبقات الجو العليا ، حيث ينتقل لآلاف الكيلومترات.

وتعتبر العواصف الترابية dust storms من العوامل الرئيسية فى نقل كميات كبيرة من التراب ، وهى تنتشر فى المناطق المتسعة الجافة وشبه الجافة ، مثل منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا ووسط استراليا

وغرب الصين وأواسط آسيا . ويترسب التراب عندما (1) تنخفض سرعة الرياح ويقل اضطراب الهواء بحيث لا تبقى الحبيبات معلقة فى الهواء ، (2) تصادم الحبيبات مع أسطح خشنة أو رطبة تصطاد تلك الحبيبات ، أو أسطح بها شحنات كهربية ضعيفة تجذبها، (3) تجمع الحبيبات لتكون تجمعات aggregates حبيبية تترسب بسبب زيادة كتلتها ، (4) غسل الحبيبات من الهواء بمياه الأمطار.

ويعمل الغطاء النباتى كمصيدة لحبيبات التراب الهابطة نتيجة انخفاض سرعة الرياح فوق المناطق المغطاة بالنباتات . وتكون الغابات أشد تأثيراً كمصيدة للتراب عن النباتات القصيرة الساق ، حيث تعمل الأشجار على خفض سرعة الرياح فى النطاق الحرج فوق سطح الأرض . كما يحدث الترسيب أيضا عندما يوجد عائق طوبوغرافى يسبب تشعب الهواء وانحراف مساره ، حيث يؤدى ذلك إلى انخفاض سرعة الرياح خلف العوائق . وذلك يفسر لماذا تكون رواسب التراب سميكة عموماً على الجانب المدابرlee side للعائق (الجانب البعيد عن الريح) ، بينما يكون الترسيب قليلا أو منعدما فى الجانب المواجه للريح windward side (الجانب الذى تهب منه الريح). وتترسب أولا حبيبات التراب الخشنة ومتوسطة الحجم المحمولة على ارتفاعات منخفضة ، بينما تُحمل الحبيبات الأدق لأعلى فى الغلاف الجوى ، ويمكن أن تبقى عالقة لفترات طويلة .

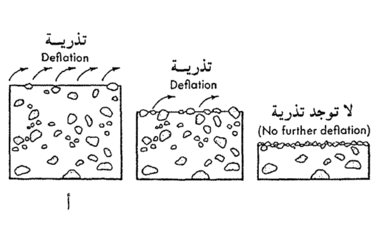
ج ـ التعرية بالرياح

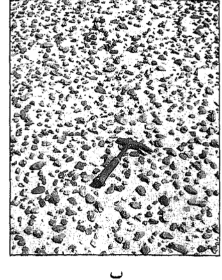
تعتبر الرياح القوية والمستمرة من عوامل التعرية المهمة ، حين تكون الأرض من تحتها جافة ولاتحتوى على غطاء نباتى . ويقوم الهواء المنساب والمحمل بالرواسب بتعرية الأرض بطريقتين هما التذرية (التجوية) والسحج (البرى) .أما التذرية (**التجوية**) **deflation** (من كلمة deflare اللاتينية بمعنى ينفخ أو يطير مع الريح) فهى اكتساح الهواء للأجزاء الجافة المفككة من الفتات الصخرى والرمل والتراب ونقلها من مكان إلى آخر ، والبرى (**السحج**) **abrasion** هو تآكل الصخر ميكانيكيا نتيجة احتكاكه واصطدامه بحبيبات راسب تحملها الرياح . وتسمى الطريقة الثانية بسفع الرمال sandblasting ، وتحدث عندما تكون الرياح المدفوعة فى مواجهة سطح الصخر المكشوف محملة بالرمال . ونعرض هنا لوصف كل من هاتين الطريقتين :

1 - التذرية

تؤدى عملية التذرية إلى نقل حبيبات التراب والغرين والرمل الجاف والمفكك من مكان إلى آخر ، وبالتالى انخفاض سطح الأرض بشكل تدريجى فى مناطق التذرية وارتفاعها فى مناطق أخرى . ويمكن أن تؤدى التذرية إلى تكون منخفضات ضحلة أو أحواض تعرف بأحواض التذرية deflation basins أو المذريات blowouts (مفردها مذرى) ، فى الصحارى والسهول الجافة أو الطبقات الجافة الموجودة فى البحيرات وسهول فيضان الأنهار. ويعطل وجود النباتات عملية التذرية فى المناطق الجافة وشبه الجافة ، حيث تعمل جذور النباتات على التحام التربة ببعضها ، بينما تصد سيقان وأوراق النباتات الرياح ، وتعمل على حماية سطح الأرض .

ويتراوح قطر حوض التذرية بين عدة أمتار (من 3 إلى 6 أمتار) إلى كيلومتر تقريبا، كما قد يتراوح عمقه بين عدة أمتار و50 مترا أو أكثر. ويرى بعض الجيولوجيين أن منخفض القطارة فى الصحراء الغربية بمصر ، وهو منخفض هائل يصل عمقه إلى حوالى 134 مترا تحت سطح البحر ، قد ساهمت التذرية الشديدة فى تكوينه ، بالإضافة إلى العوامل التكتونية . وعموما ، فإن المستوى الذى يصل إليه سطح التذرية يكون محكوما بمنسوب الماء الجوفى.





شكل (11.15) : عملية التذرية (التخوية) Deflation .

أ) مراحل تكون الرصيف الصحراوى desert pavement نتيجة تذرية رواسب رديئة الفرز

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

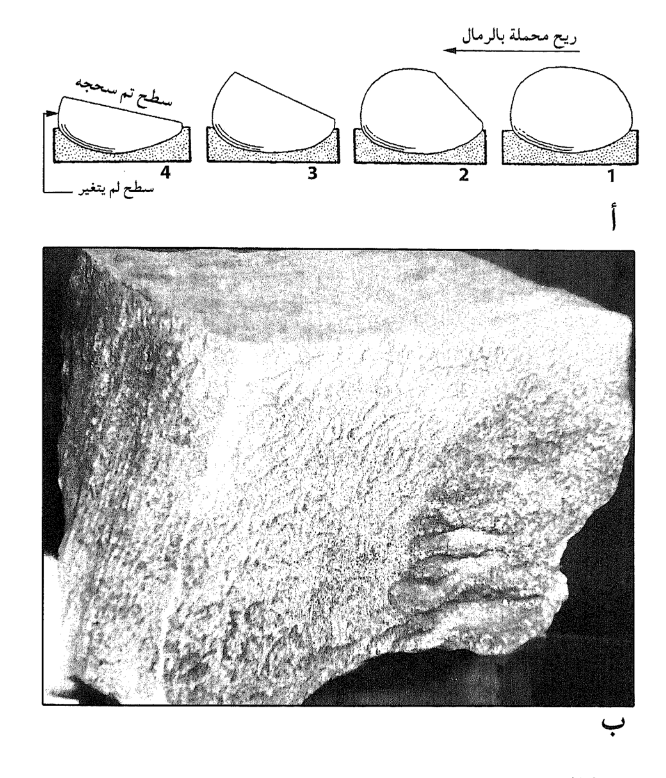
ب) رصيف صحراوى مكون من غطاء مستمر من الأحجار فوق أرضية وادى يعمل كدرع يحمى التربة والرواسب أسفله من أى تعرية جديدة ، جبل القطرانى – الصحراء الغربية – مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور ، هيئة المواد النووية).

وعندما تزيل التذرية الحبيبات الدقيقة المكونة من الرمال والغرين والصلصال من التربة والرواسب ، فإن السطح المتبقى يكون مغطى بحصى كبير الحجم يصعب نقله بالرياح. وتعمل التذرية المتوالية للمواد الدقيقة على مدى آلاف السنين على بقاء الحصى وتتكون طبقة أو غطاء مستمر من الأحجار يعرف **بالرصيف الصحراوى desert pavement** ، حيث يعمل هذا السطح كدرع يحمى التربة والرواسب أسفله من أى عملية تعرية جديدة (شكل 11.15). ويعتقد بعض الجيولوجيين أن الرصيف الصحراوى قد يتكون بانسياب المياه من الأمطار الغزيرة وليس بالتذرية ، كما قد يتكون بأسباب أخرى .

2 – سفع الرمال

يعرف سفع الرمال **sandblasting** بأنه عملية تعرية الصخر بفعل الرياح المحملة بالرمال عندما تضرب وجه الصخر . ويلاحظ المسافرون على الطرق الصحراوية فى منطقتنا العربية تأثير الرياح المحملة بالرمال خاصة على زجاج السيارات الأمامى فى الرحلات الطويلة . وتشبه عملية سفع الرمال عملية تنظيف المبانى الأثرية والآثار باستخدام هواء مندفع تحت ضغط عالٍ ومحمل بالرمال ، والتى تشمل تآكل سطح صلد نتيجة اصطدام حبيبات مندفعة بسرعة عالية . ويحدث السفع بالرمال أساسا بالقرب من سطح الأرض ، حيث تُحمل معظم حبيبات الرمل . ويؤدى السفع بالرمال إلى تعرية ونعومة مكاشف الصخر والجلاميد والحصى والرمال وتخشين (صنفرة) أسطح القوارير (الأوانى) الزجاجية.

والوجهريجات **ventifacts** هى حصى مواجه للريح ، تكونت بها عدة أسطح منحنية أو مستوية تقريباً ، تتقابل عند حروف حادة . وقد تكّون كل وجه أو سطح صغير نتيجة سفع الرمال لجانب الحصى المواجه للريح windward side (شكل 12.15) .



شكل (**12.15**): وجهريجيات ventifacts

أ) مراحل تكون وجهريجية ventifact نتيجة سفع الرمال sandblasting فى جانب الحصى المواجه للريح ، حيث تصبح الحصاة pebble وجهريجية بين المرحلتين الثالثة والرابعة .

(After Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

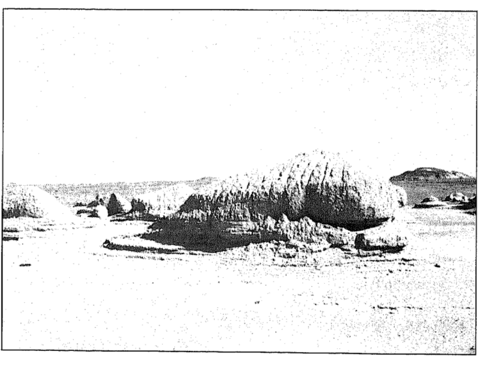
ب) وجهريجية ، منطقة أبو رواش – شمال القاهرة – مصر . (مجموعة أ.د. سليمان محمود سليمان ، قسم الجيولوجيا – جامعة عين شمس) .

وتؤدى العواصف أحيانا إلى دوران أو تقليب الحصى ، مما يعرض جانب جديد منها لسفع الرمال . ويمكن استخدام الوجهريجيات لتحديد وقياس اتجاه الرياح السائدة ، نظرا لأن الأسطح المستوية للحصى تتكون فى مواجهة الريح كما ذكرنا .

واليارادانج (حيد ريحى) yardang (مشتقة من كلمة تركية بمعنى منحدر حاد أو جرف) وتعرف أيضا بالضلوع الصحراوية هى عبارة عن حيود مستطيلة ومتوازية تفصلها أخاديد أو ممرات ضيقة تكونت نتيجة التعرية بالرياح ، وتصطف موازية لاتجاه الريح السائدة. ويكون لبعض اليارادنج شكل يشبه جسم سفينة مقلوبة . ويعتبر اليارادانج أحد المعالم الشائعة المتكونة بفعل الرياح فى الصحارى الحارة ، مثل الصحراء الغربية المصرية . وتتواجد اليارادانج عادة فى مجموعات (شكل 13.15) . ويكون ارتفاع هذه الحيود أقل من 15 مترا وطولها 100 متر أو أكثر ، ولكن قد يصل طول اليارادانج الواحد المفرد إلى عشرات الكيلومترات ، وارتفاعه إلى حوالى 100 متر . وتتميز اليارادانج بأن لها عدة قمم ، وأنها منحوتة من صخور رسوبية متماسكة صلبة أو صخور متبلورة (نارية ومتحولة) أو فى رواسب بحيرات قديمة غير متماسكة نسبيا (شكل 13.15) نتيجة للسحج (البرى) بالغبار والغرين ، وتكون كلها معرضة للتعرية الشديدة.

د ـ الترسيب بالرياح (الرواسب الريحية)

عندما تنخفض سرعة الرياح بدرجه كبيرة فإنها لا تستطيع نقل حمولتها من الرمال والغرين والتراب ، وتترسب أولاً المواد الخشنة لتكوّن الكثبان الرملية مختلفة الأشكال ، وتتراوح فى الحجم بين هضاب صغيرة مدورة knolls منخفضة وتلال ضخمة قد يصل ارتفاعها إلى أكثر من 100 متر . وتتساقط حبيبات الغرين والتراب الأدق حجما لتكون غطاءً منتظما تقريبا من الغرين والصلصال . ويقوم الجيولوجيون بدراسة هذه العمليات الترسيبية وربطها بخواص الرواسب ، خاصة التطبق والنسيج ،



شكل (13.15): حقل ياردنج yardangs بمنطقة واحة الفرافرة ، نحتت فى صخور البلايا الصحراء الغربية - مصر .

لاستنتاج المناخات وأنماط الرياح القديمة . ونعرض فيما يلى الأنواع المختلفة للرواسب التى تكونها الرياح .

1 - الكثبان الرملية

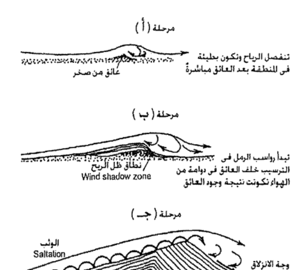
الكثيب الرملى sand dune هو تراكم من رمل سائب يأخذ شكل مرتفع أو تل ، ترسب وتشكل بالرياح . وتغير الكثبان النشطة شكلها باستمرار بتغير اتجاه الريح . وتتكون الكثبان الرملية عندما يكون هناك مصدر للرمال مثل صخور الجرانيت أو صخور الحجر الرملى التى يتم تجويتها بسهولة ، بحيث يسهل انفصال حبيبات الرمل منها ، أو شاطئ يوجد بالقرب منه مصب نهر قريب . ويمنع وجود غطاء نباتى تحرك الكثبان الرملية ، حيث تكون حينئذ غير نشطة ومستقرة ، أو حينما تتغير اتجاهات الريح أو مصادر الإمداد بالرمل . ويلخص جدول (2.15) أنواع الكثبان الرملية المهمة ، والتى صُنفت اعتماداً على كمية الرمال المتاحة وتغير قوة واتجاه الريح ، وكذلك كمية ونوعية الغطاء النباتى.

وتتكون حبيبات رمل الكثيب الرملى عموما من معدن الكوارتز ، وهو معدن صلب يتحلل كيميائياً بصعوبة . ويتكون الكثيب بسبب وجود أية عوائق غير منتظمة على سطح الأرض تسبب انحراف انسياب الهواء . وتتغير سرعة الرياح عموما على ارتفاع متر أو مترين من سطح الأرض مع أى تغيرات طفيفة فى شكل سطح الأرض . فعندما تقابل الرياح أى عائق صغير، فإنها تندفع فوقه وحوله وتترك منطقة بعد العائق مباشرة تكون سرعة الهواء فيها أبطأ ما يكون ، حيث تنخفض سرعة الرياح المحملة بحبيبات الرمل فى هذه المنطقة والتى تعرف بنطاق ظل الريح windshadow zone ، وتبدأ الرمال فى التراكم .

ويؤثر هذا التراكم للرمال بدوره على انسياب الهواء ، ويصبح هذا التراكم نفسه عائقا ، ويستمر هذا التراكم فى النمو فى الجانب المدابر للعائق حتى يصبح كثيبا.

شكل وحجم الكثيب : يكون الشكل النموذجى للكثيب الرملى غير متماثل ، حيث يكون الانحدار لطيفا فى الجانب المواجه للريح windward side ولاتزيد زاوية الانحدار فيه عن 12° ، بينما يكون الوجه المدابر lee face للريح حاد الانحدار . وتكون زاوية استقرار الحبيبات فى حدود 33° إلى 34° تقريباً (زاوية الاستقرار angle of repose هى أقصى زاوية يمكن أن يستقر عندها الراسب المتراكم قبل أن ينهار) . وعندما ينمو كثيب الرمل بسبب وجود عائق يسبب انفصال الريح وتكوّن ظل الريح ، فإن كل الركام يبدأ فى الهجرة فى اتجاه الريح نتيجة لحركة حبيبات الرمل . وتتحرك حبيبات الرمل بالوثب على مستوى الانحدار المواجه للريح ، وهو انحدار تكون زاوية ميله صغيرة حتى قمة الكثيب ، لتسقط فى ظل الريح windshadow على الانحدار المدابر للريح (شكل 14.15) (ظل الريح هو المنطقة خلف عائق ما حيث تنخفض سرعة الريح وتكون حركة الهواء غير قادرة على تحريك المواد). وتبنى هذه الحبيبات تدريجيا تراكما انحداره حاد وغير مستقر على الجانب العلوى من الوجه المدابر للريح . وتتكرر دوريا عملية البناء غير المستقر حيث ينزلق الرمل بسرعة على الوجه المدابر للريح . ولذلك يعرف أيضا الوجه المدابر لكثيب نشط **بوجه الانزلاق (مسقط الرمل) slip face** .

ويؤدى الانزلاق المستمر والمتتابع لحبيبات الرمل إلى أن تحافظ أوجه الانهيال على زاوية الاستقرار ثابتة ، بالإضافة إلى تكون تطبق متقاطع**cross strata** ، وهو سمة مميزة للكثبان التى تكونت نتيجة تغيرات فى

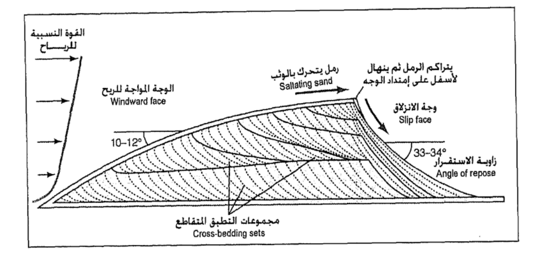


شكل (**14.15**): مراحل تكون الكثبان الرملية .

(After Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York).

سرعة واتجاه الرياح (شكل 15.15) . وعلى الرغم من أن الكثبان الرملية تتراكم وتتداخل مع بعضها أحيانا ، حيث يتم دفنها تحت تتابعات رسوبية وتختفى الأشكال الأصلية للكثبان ، إلا أن الطبقات المتقاطعة تبقى موجودة . ويستدل الجيولوجيون من وجود تلك الطبقات المتقاطعة والتى تمثل أوجه انزلاق سابقة ، على وجود كثبان تكونت بالرياح ، كما يمكنهم أيضا استنتاج اتجاه الريح فى الماضى . وينمو الكثيب ويزداد ارتفاعا ، إذا كان معدل تراكم حبيبات الرمل على الجانب المواجه للريح أكبر من معدل تراكمه على وجه الانزلاق . وتصل الكثبان الرملية إلى ارتفاع يتراوح بين 30 مترا و 100 متر ، كما قد يصل بعضها الآخر إلى حوالى 250 مترا ، كما هو الحال فى المملكة العربية السعودية.

- أنواع الكثبان الرملية : يمكن التمييز بين خمسة أنواع رئيسية من الكثبان الرملية بناءً على كمية الرمال المتاحة وتغير قوة واتجاه الريح وكمية ونوعية الغطاء النباتى ، وهى كثيب برخان وكثيب مستعرض وكثيب طولى وكثيب نجمى وكثيب بارابولى (قطع مكافئ أو

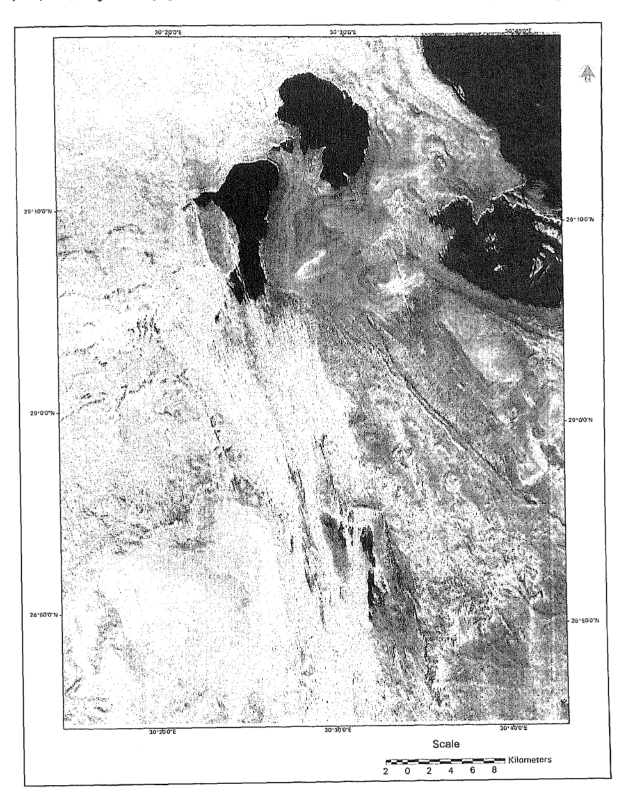


شكل (**15.15**): السمات المميزة لكثيب رملى . يوضح المقطع العرضى فى كثيب البرخان الانحدار اللطيف فى الجانب المواجه للريح والانحدار الحاد لوجه الانهيال slip face. وتتراكب طبقات قمة الكثيب فوق طبقات تتميز بالتطبق المتقاطع cross bedding ، والذى يمثل أوجه انهيال قديمة . وعندما تتحرك حبيبات الرمل بالوثب على الجانب المواجه للريح فإنها تتراكم عند قمة وجه الانهيال قبل أن تنهار وتسقط على وجه الانهيال ، حيث تستقر الحبيبات .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

عكسي) . ويوضح جدول (2.15) تلك الأنواع المختلفة من الكثبان الرملية .

• كثبان البرخان : يأخذ كثيب البرخان **barchan dune** شكلاً هلاليًّا ولذلك تعرف أيضا بالكثبان



شكل (**16.15**): صورة فضائية لكثبان طولية (سيفية) في الصحراء الغربية - مصر .

الهلالية crescentic dunes ، ويتكون عادة فى مجموعات إلا أنه يكون مفردا أحيانا . وهو يتحرك على سطح مستو من الحصى أو صخر الأساس حيث تشير نقطتا الهلال (القرنانhorns) إلى اتجاه الريح السائدة، ويتقدم وجه الانهيال المقعر فى اتجاه الريح . وتتكون كثبان البرخان عندما يكون إمداد الرمال محدودا واتجاه الرياح ثابتا ومستمرا . وقد تهاجر كثبان البرخان لمسافات طويلة دون أن تغير من شكلها ، إلا أن شكلها قد يتغير إذا ما التحمت بكثبان برخان أخرى أو اعترضها عائق صخرى أو نباتى . ويوضح شكل(17.15) بعض كثبان البرخان بوسط سيناء بمصر .

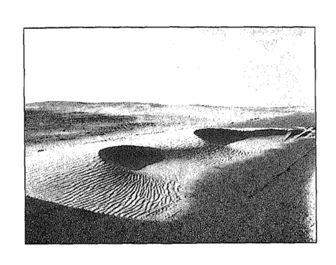
- **الكثبان المستعرضة:** قد تلتحم عدة كثبان برخان معا لتكون حيودا طويلة وضيقة ، حيث يكون اتجاه استطالتها مستعرضا أى عموديا على اتجاه الريح . وتمثل هذه التلال الملتحمة مرحلة انتقالية بين كثيب البرخان والكثبان المستعرضة **transverse dunes** ، والتى تكون فى هيئة حيود متموجة طويلة وعمودية على اتجاه الريح السائدة ، وهى بذلك تشبه أمواج المحيط التى تكون مستعرضة على اتجاه الريح . وتتكون الكثبان المستعرضة فى المناطق الجافة القاحلة حيث تتواجد الرمال بوفرة وينعدم الغطاء النباتى تقريباً. وتكون أحزمة الكثبان الرملية قرب الشواطئ عبارة عن كثبان مستعرضة تتكون نتيجة الرياح القوية . وتستقر الكثبان المستعرضة فى المناطق المعتدلة أو الرطبة على مسافة من الشاطئ .

- **الكثبان الطولية :** تكون الكثبان الطولية **linear dunes** وتسمى أيضا الكثبان السيفية seif dunes (مستمدة من الكلمة العربية سيف) أو الحافات الرملية ، وهى عبارة عن حيود أو تلال طولية مستقيمة أو متعرجة قليلا ، وتكون موازية تقريباً للاتجاه العام للريح السائدة . وقد تصل هذه الكثبان إلى ارتفاعات تصل إلى 100 متر ، وقد تمتد لعدة كيلومترات . ومازال تفسير أصل الكثبان الطولية موضع نقاش حتى الآن . ولكن يعتقد معظم الجيولوجيين أن تلك الكثبان تتكون نتيجة هبوب الرياح من اتجاهات ثابتة تحدد الامتداد الطولى للكثيب ، مع رياح أخرى تأتى من اتجاهين جانبيين تعمل على تجميع الرمال . وتوجد معظم المساحات المغطاة بالكثبان الطولية بالقرب من المناطق التى يوجد بها إمداد متوسط من الرمال. وتنتشر الكثبان الطولية على نطاق واسع فى مصر . خاصة فى وسط الصحراء الغربية بمصر (شكل 16.15).

- **الكثبان النجمية:** توجد الكثبان النجمية **star dunes** على هيئة كثبان هرمية ضخمة منفصلة تشبه قاعدتها النجمة ، حيث تكون لها أذرع شعاعية متعرجة . وترتفع تلك الأذرع الشعاعية ناحية مركز الكثيب حتى تنتهى فى قمة حادة . وقد تصل الكثبان النجمية إلى ارتفاع يتراوح بين 50 و 150 مترا ، إلا أنها قد تصل إلى 300 متر فى الارتفاع. وتتكون تلك الكثبان تحت تأثير الرياح التى تهب من كل الاتجاهات . وتميل تلك الكثبان النجمية إلى أن تبقى ثابتة فى مكانها . وقد بقيت الكثبان النجمية فى صحراء المملكة العربية السعودية ثابتة فى مكانها لعدة قرون ، حيث أصبحت من العلامات المميزة للمسافرين فى تلك الصحارى.

• **كثبان القطع المكافئ أو العكسى (البارابولية)** وتعرف أيضا بالكثبان العكسية reversed dunes: تأخذ قمة **كثيب القطع المكافئ parabolic dune** شكل قوس في اتجاه الريح مثل حرف **U** أو **V** ، له ذراعان متدليان يتحركان على الأرض . وهناك نوع من كثبان القطع المكافئ يسمى **كثيب الانطلاق blowout dune** يتكون بالقرب من الشواطئ . ويوجد هذا النوع من الكثبان فى المناطق التى يتوافر بها إمدادا وفير من الرمال ، حيث تهب الرياح المحملة بالرمال فى اتجاه اليابس بعيدا عن الشاطئ ، فيتكون منخفض يشبه طبق الفنجان نتيجة عملية التذرية ويتراكم الرمل على هيئة تل منحنى يشبه حدوة الحصان. وتستقر تلك الكثبان بالنباتات التى تنمو فوقها . وعلى عكس كثيب البرخان ، الذى يشبه كثيب الانطلاق ظاهرياً ، فإن قرنا (ذراعا) كثيب القطع المكافئ يكونان فى الاتجاه المواجه للريح ، ويكون وجه الانزلاق المنحنى محدبا ، ويتقدم فى اتجاه الريح ، لأن النباتات تعمل على تثبيت الذراعين بينما يتقدم الجزء الأوسط الذى يخلو أو تقل به النباتات إلى حد كبير .

- **هجرة الكثبان:** يؤدى انتقال الرمال من الجانب المواجه للريح windward side إلى الجانب المدابر النشط lee side إلى هجرة الكثيب ببطء فى اتجاه الريح . وقد أظهرت بعض القياسات التى أجريت على حركة كثبان البرخان أن معدل هجرتها كان كبيرا ، حيث وصل إلى معدل 25 مترا فى العام . ومن المعروف أن هجرة الكثبان (شكل 17.15)، وخاصة على امتداد الشواطئ الرملية وعبر الواحات فى الصحارى ، قد تتسبب فى دفن المنازل وحقول الزراعات، وفى ملء القنوات والمجارى المائية ، كما تهدد المدن أيضا. وتعالَج هجرة الكثبان الرملية فى تلك المناطق بزرع الكثبان بالنباتات التى تقاوم الجفاف وتعيش فى التربة الرملية الجافة لتلك الكثبان . ويمنع الغطاء النباتى المستمر هجرة الكثبان للسبب نفسه الذى يمنع به التذرية ، حيث تعمل جذور النباتات على تماسك التربة وحبيبات الرمل ، وبالتالى تمنعها من الحركة ، أى تمنع هجرة الكثيب .



شكل (17.15): صورة توضح هجرة الكثبان الرملية (برخان) على طريق المغارة – الاسماعيلية ، وسط سيناء – مصر . (أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية) .

2 ـ بحار الرمال

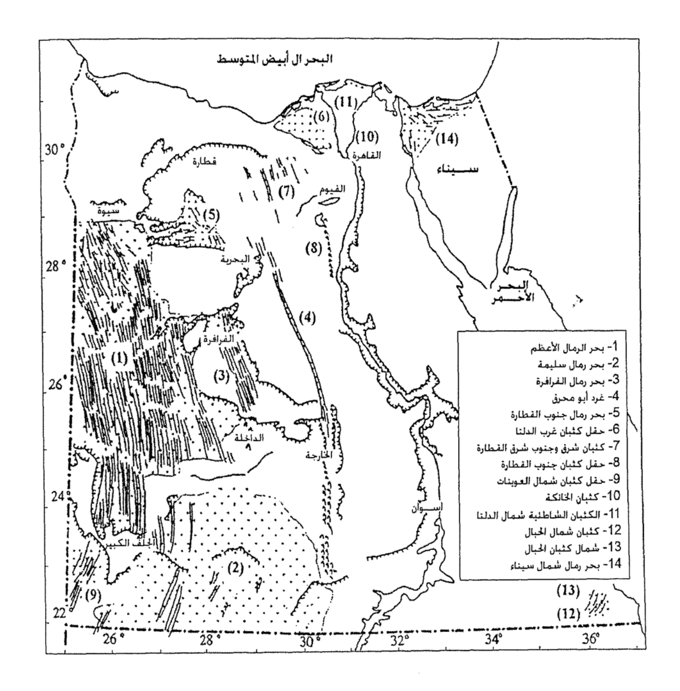
تعرف المنطقة الشاسعة من الرمال المتحركة فى بعض الصحارى الكبرى ، والتى يوجد بها تجمع هائل من الكثبان الرملية وتهب فيها الرياح بقوة **ببحر الرمال sand sea** ، كما يعرف بحر الرمال أحيانا بصحراء العرق erg. وتتميز مناطق بحار الرمال بتوافر إمدادات كبيرة من الرمال وغياب الطرق الصالحة للانتقال عبرها ، وعدم وجود معالم طوبوغرافية محددة. وتوجد بحار الرمال فى الصحارى الكبرى مثل تلك

جدول 2.15: الأنواع الرئيسية للكثبان الرملية بناءً على شكلها .

نوع الكثيب	الشكل	الوصف ومكان التواجد	الشكل
كثيب البرخان Barchan dune	كثيب هلالى	كثيب ذو شكل هلالى وقرنان يشيران إلى الاتجاه المدابر للريح . يوجد فى المناطق الصحراوية المسطحة الصلبة التى يكون اتجاه الرياح فيها ثابتا تقريباً، وإمداد الرمال محدودا . وتتواجد كثبان البرخان أحيانا فى مجموعات ، ويتراوح ارتفاعها بين متر واحد وأكثر من 50 متراً.	
كثيب مستعرض Transverse dune	حيود تشبه الأمواج	كثيب على شكل حيد أو مرتفع غير متماثل الشكل ، يكون عموديا على اتجاه الريح السائد . ويوجد فى المناطق التى بها وفرة من الرمال. وقد يتكون نتيجة التحام عدد من كثبان البرخان ببعضها . وتشبه الكثبان المستعرضة سطح المحيط حين تهب عليه العواصف .	
كثيب طولى Linear dune	حيود متوازية	كثيب على شكل حيد أو تل مرتفع طويل، يكون مستقيم الشكل تقريباً . ويوجد فى المناطق الصحراوية التى يكون بها إمداد متوسط من الرمال، ويكون اتجاه الرياح فيها متغيرا ، غالب اتجاهان فقط .	
الكثيب النجمى Star dune	نجمة لها أذرع متعددة	تل هرمى منفصل ، يشبه قاعدة النجمة المتعرجة، وتكون قمته مركزية . وقد يصل ارتفاع الكثيب النجمى إلى 300 متر، ويوجد فى المناطق التى تهب فيها الرياح من كل الاتجاهات.	
كثيب القطع المكافئ أو العكسى Parabolic dune	قوس منحنى	عكس كثيب البرخان تقريباً ، حيث يأخذ شكل حرف U أو V وتكون نهايته المفتوحة فى اتجاه الريح الصاعد. الذراعان المتدليان يشيران أيضا إلى الاتجاه المواجه للريح . ويشيع تواجد كثيب القطع المكافىء فى المناطق الساحلية وفى المناطق التى تظهر فيها بعض النباتات .	

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

الموجودة فى شمال وغرب أفريقيا وشبة الجزيرة العربيـة والصحارى الكبرى فى غرب الصين وفى غرب ووسط استراليا . وقد يغطى بحر الرمـال مـساحات تـصل إلى 500000 كـم^2 أو أكثـر كـما هـو الحـال فى الـصحراء الكبرى بأفريقيا. ويوضح (شكل 18.15) توزيع بحار الرمال وحقول الكثبان الرملية فى مـصر، بينما يوضح جدول (3.15) مساحات بحار الرمال وحقول الكثبان الرملية بالصحراء الغربية المصرية .



شكل (18.15): توزيع بحار الرمال وحقول الكثبان فى مصر .

(After Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, vol. 1. The Egyptian Geographic Soc., Cairo).

جدول (3.15): مساحة بحار الرمال وحقول الكثبان الرملية فى الصحراء الغربية – مصر

الاسم	(1) المساحة الكلية (كم^2)	(2) مساحة الكثبان (كم^2)	النسبة المئوية لمساحة الكثبان
بحار الرمال Sand Seas			
بحر الرمال الأعظم	114400	85600	74.6
الغطاء الرملى لواحة سليمة	63200	56000	88.6
بحر الرمال جنوب القطارة	10400	6800	65.4
بحر رمال الفرافرة	10300	7000	68.0
غرد أبو محرق	6000	4000	66.6
حقول الكثبان Dune Fields			
شرق وجنوب شرق القطارة	28754	6127	21.3
شمال العوينات	8000	2800	35.0
غرب الدلتا	4400	3200	72.7
جنوب الريان	1200	0.375	31.1
المجموع	246654	171527	69.5

(After Embabi, N.S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, Vol. 1. The Egyptian Geograph. Soc., Cairo).

3 ـ لُويِّس: الأتربة المتساقطة

تغطى سطح الأرض فى مناطق كثيرة من العالم، وخاصة عند خطوط العرض الوسطى، رواسب من التراب dust وغيره من الرواسب الدقيقة الأخرى التى تكونت نتيجة الترسيب من عواصف ترابية على امتداد آلاف السنين. ويعرف هذا الراسب **بلُويِّس loess** (من كلمة ألمانية بمعنى مفكك وتنطق عادة لُوس). ويتميز اللويس بأنه تراب ترسب بواسطة الرياح، ويتكون معظمه من الغرين، ولكن يصاحبه عادة بعض الرمل الناعم والصلصال. وعموما، فإن اللويس يكون لونه أصفر إلى لحمى ومتجانس ولا يوجد به أى تطبق. ويميل اللويس لأن يتكسر على امتداد جروف رأسية عندما ينكشف نتيجة قطعه بمجرى مائى أو أثناء شق الطرق، كما لو أنه صخر التحمت حبيباته بشدة. وترجع خاصية تماسك اللويس إلى انجذاب جزيئات حبيبات الراسب بشدة بحيث تجعل منه صخرا متماسكا. كما أنه من السهل جدا تعريته بالمياه الجارية، كما يحدث على جوانب نهر الهوانجهو فى الصين، عندما يزول الغطاء النباتى عنه. ويتميز اللويس بخاصتين تدلان على أنه ترسب بواسطة الرياح وليس من مياه المجارى المائية: (1) يكوّن اللويس غطاء منتظما نسبيا يغطى التلال والوديان بالطريقة نفسها على مدى واسع من الارتفاعات، (2) يحتوى اللويس على حفريات نباتية أرضية land plants وحيوانات تتنفس الهواء.

وتوجد أشد رواسب اللويس سمكًا فى شمال الصين، حيث توجد طبقة يبلغ متوسط سمكها حوالى 30 مترا، بينما يبلغ السمك أحيانا حوالى 180 متر، وتغطى هذه الرواسب آلاف الكيلومترات. ويبدو أن مصدر

الراسب كان من داخل قارة آسيا . وتستخدم أحيانا رواسب اللويس فى عمل الكهوف والسكنى نظراً لسهولة حفرها، سواء فى الصين أو وسط أوروبا. ويرجح أن وجود اللويس فى شرق السودان يرجع إلى أن تلك الرواسب قد نشأت فى الصحراء الكبرى فى غرب السودان . وقد وجدت أيضا مساحات شاسعة من رواسب اللويس فى الولايات المتحدة ووسط أوروبا ووسط آسيا والأرجنتين حيث تستخدم تلك الرواسب فى الزراعة ، مع إمكانية تعرضها للتعرية فى الوقت نفسه .

4 ـ الرماد البركانى

لا تنشأ كل الرواسب المتكونة بالرياح من عملية التذرية . فهناك كميات ضخمة من التفرا tephra (الفتات النارى) تقذف أثناء ثوران البركان فى الغلاف الجوى . وعلى الرغم من أن الحبيبات الخشنة والثقيلة تتساقط بسرعة من عنق البركان ، إلا أن الحبيبات الدقيقة يمكن أن تحمل لمسافات بعيدة . وتستطيع الحبيبات الدقيقة التى تصل إلى طبقة الاستراتوسفير أن تدور حول الأرض عدة مرات . وتكوّن الحبيبات التى تتساقط أثناء ثوران البركان تيارا صاعدا مستطيلا من الرواسب ، والتى يقل فيها حجم الحبيبات وكثافتها كلما ابتعدنا عن البركان . ويمكن للجيولوجيين عند فحص الطبقات المتكونة من الرماد البركانى استنتاج مسارات الرياح التى سادت أثناء نشاط البركان. وعلى الرغم من أن رواسب الرماد البركانى تشبه رواسب اللويس ، إلا أنه يمكن عند تحديد التركيب المعدنى النارى ووجود فتات من الزجاج البركانى تمييز طبقات التفرا من اللويس .

II. الصحارى

على الرغم من أن كلمة "صحراء" تعنى حرفيا منطقة غير مأهولة بالسكان وخالية تقريباً من النباتات ، إلا أن التقدم العلمى الحديث فى تقنيات تحلية المياه وفى إيجاد مصادر صناعية للماء غيّر معنى هذه الكلمة ، وأصبحت كثير من المناطق الصحراوية الآن آهلة بالسكان ومناسبة للزراعة . ومثال ذلك المنطقة الصحراوية فى شبة الجزيرة العربية ، ومحاولة تعمير الصحارى فى مصر وليبيا وغيرها من مناطق العالم . ولذلك يستخدم مصطلح صحراء desert الآن كمرادف للأرض التى يكون معدل الأمطار السنوى فوقها أقل من 250 مم ، أو التى يزيد فيها معدل البخر عن معدل سقوط الأمطار ، بغض النظر عن تواجد سكان من عدمه . ولذلك يعتبر الجفاف (القحولة) صفة مميزة لأى صحراء . ويسود المناخ الجاف فى المناطق الصحراوية ، حيث لا يساعد ذلك المناخ على خصوبة الأرض ، ويتميز بندرة المطر أو انعدامه وشدة الرياح وقوة الإضاءة وشدة ارتفاع درجة الحرارة وانخفاضها . وقد يطلق مصطلح صحراء على المناطق القطبية أيضا .

أ. مناطق تواجد الصحارى

تمثّل المناطق الصحراوية بمختلف أنواعها حوالى 30 ٪ من مساحة يابس العالم ، باستثناء المناطق القطبية. وبالإضافة إلى ذلك ، فإنه توجد نسبة أقل من الأراضى شبه الجافة semiarid land ، والتى تتميز بأن معدل الأمطار السنوى بها يتراوح بين 250 مم و500 مم. وتمثل المناطق الجافة وشبه الجافة نموذجا مميزا على خريطة العالم (شكل 1.15) ، حيث إن توزيع المناطق الصحراوية على الكرة الأرضية ليس عشوائياً، وإنما يرتبط كما سبق أن ذكرنا ، بجغرافية الأرض وبدورة الغلاف الجوى وأحزمة الرياح . وقد أمكن تعرف خمسة أنواع من الصحارى (جدول 15-4) .

وعندما نقارن الشكل الذى يوضح التوزيع العام لأحزمة الرياح فوق سطح الكرة الأرضية نتيجة دوران الغلاف الجوى (شكل4.15)، مع خريطة توزيع المناطق الجافة وشبه الجافة وتوزيع الصحارى الرئيسية (شكل 1.15)، فإن تلك المقارنة توضح على الفور وجود علاقة بينهما. وترتبط معظم الصحارى، بحزامين حول العالم للهواء الجاف الهابط بين خطى عرض 20° و 30°. وتشمل أمثلة تلك المناطق صحارى كالاهارى والصحراء الكبرى فى شمال أفريقيا، والربع الخالى فى المملكة العربية السعودية وإيران وصحراء أستراليا الكبرى. وتمثل هذه الصحارى النوع الأول من الصحارى وهى الصحارى شبه المدارية semitropical.

ويوجد النوع الثانى من الصحارى فى المناطق القارية الداخلية بعيدا عن مصادر الرطوبة، حيث يسود صيف حار وشتاء بارد (مناخ قارى). ويشمل هذا النوع صحارى جوبى وتاكلاماكان فى وسط آسيا.

ويوجد النوع الثالث من الصحارى عندما تعمل سلسلة جبال كحاجز لانسياب الهواء الرطب المنساب من المحيط، مما يسبب وجود منطقة فى الجانب المدابر للجبل يقل فيها تساقط الأمطار، وتسمى تلك المنطقة بظل المطر rainshadow. وعندما يصعد الهواء البحرى المتحرك على الشاطئ على الانحدار المواجه للريح لأى سلسلة جبلية فإنه يبرد، مما يقلل كمية الرطوبة التى يمكن أن يحتفظ بها الهواء، وتتساقط الأمطار على الجانب المواجه للرياح. ويحتوى بذلك الهواء الذى يصل إلى الجانب المدابر لسلسلة الجبال على قليل من الرطوبة، مما يؤدى إلى نشأة مناخ جاف فوق المنطقة خلف سلسة الجبال. وتكوّن سلسلة الكاسكيد وسيرانيفاذا فى غرب الولايات المتحدة مثل هذا الحاجز مما يتسبب فى نشأة مناطق صحراوية شرق هذه الجبال مباشرة.

جدول (**4-15**) أنواع الصحارى الرئيسية وأصلها

نوع الصحراء	الأصل	الأمثلة
شبه مدارية Subtropical	تتركز فى أحزمة هبوط الهواء الجاف عند خطوط عرض 20°-30° شمالا وجنوبا تقريبا.	الصحراء الكبرى والسند وكلهارى واستراليا الكبرى
قارية Continental	فى المناطق القارية الداخلية بعيدا عن مصادر الرطوبة	جوبى وتكلاماكان فى وسط آسيا
ظل المطر Rainshadow	فى الجانب المدابر من حواجز الجبال التى تعترض الهواء المنساب من المحيط المحمل بالرطوبة	الصحارى الواقعة فى الجانب المدابر من السيرانيفادا والكاسكيد والأنديز
ساحلية Coastal	الحواف القارية حيث يسبب ماء البحر المتدفق لأعلى تبريد الهواء البحرى المنساب من البحر ناحية الشاطئ	سواحل بيرو وجنوب غرب أفريقيا
قطبية Polar	فى المناطق التى يهبط بها هواء جاف بارد، مما يسبب تساقط قليل جدا من الأمطار	شمال جرينلاند ومناطق أنتاركتيكا الخالية من الجليد

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتتواجد الصحارى الساحلية على حدود القارات ، حيث تنخفض درجة حرارة الهواء البحرى المندفع فى اتجاه الشاطئ نتيجة تأثير ماء البحر البارد المتدفق لأعلى مما يقلل من قدرة الهواء على أن يحتفظ بأى رطوبة . وعندما يقابل الهواء البارد الأرض الدافئة ، فإن محتواه المحدود من الرطوبة يتكثف ويتكون ضباب ساحلى. وعلى الرغم من وجود الضباب ، فإن محتوى الهواء من الرطوبة يكون قليلا جدا لكى يسبب سقوط أمطار غزيرة ، ولذلك تبقى المنطقة الساحلية صحراوية . وتعتبر الصحارى الساحلية الموجودة فى بيرو وجنوب غرب أفريقيا ، والتى تمثل النوع الرابع من الصحارى ضمن أكثر المناطق جفافا على وجه الأرض. وتتميز الأنواع الأربعة السابقة من الصحارى بأنها صحارى الحارة ، حيث يكون تساقط المطر منخفضا ودرجات حرارة فصل الصيف مرتفعة .

ويشمل النوع الخامس من الصحارى ، مساحات شاسعة من صحارى المناطق القطبية، حيث يكون تساقط المطر نادرا للغاية أيضاً ، نتيجة هبوط هواء بارد جاف . وعلى الرغم من ذلك التشابه، إلا أن الصحارى الباردة تختلف عن الصحارى الحارة عند خطوط العرض المنخفضة فى أمر مهم ، وهو أنه يوجد وفرة من الماء تحت سطح الصحراء القطبية ، ولكن يكون معظمها فى شكل جليد . وقد تبقى درجة حرارة الهواء تحت درجة التجمد حتى فى منتصف فصل الصيف ، حين تكون الشمس فوق الأفق لمدة 24 ساعة يوميا. وتوجد الصحارى القطبية فى شمال جرينلاند بالمنطقة القطبية الشمالية فى كندا وفى الوديان الخالية من الجليد فى أنتاركتيكا (القارة القطبية الجنوبية). وتعتبر تلك الصحارى أقرب مناطق الأرض شبها بسطح المريخ ، حيث تبقى درجات الحرارة أيضاً تحت درجة التجمد ويكون الغلاف الجوى جافا للغاية.

ب - مناخ الصحراء

ينشأ المناخ الجاف (القاحل) arid climate فى الصحارى الحارة من ارتفاع درجة الحرارة ، بالإضافة إلى ندرة سقوط المطر وارتفاع معدل البخر. ولقد سُجلت درجة حرارة الهواء فوجد أنها وصلت إلى أكثر من 50 درجة مئوية فى دولة قطر فى الخليج العربى وحوالى 58° فى الصحراء الليبية فى شمال أفريقيا . ولقد مر عقد من الزمان أو أكثر على صحراء أتاكاما فى شمال شيلى دون سقوط أى أمطار . ويؤدى ارتفاع درجة الحرارة فى مثل هذه الصحارى الحارة إلى زيادة معدل التبخير.

وترتفع درجة حرارة الهواء فوق مناطق الصحراء الساخنة فى ساعات النهار ، حيث يتمدد الهواء ويرتفع لأعلى . وتنشأ الرياح القوية نتيجة حركة الهواء السطحى ليحل بسرعة محل الهواء الساخن الصاعد . لذلك تتميز الصحارى الحارة بأنها قاحلة ، وأن الرياح بها تكون قوية أيضاً .

جـ - التجوية فى الصحراء

تعمل العمليات الجيولوجية نفسها فى كل من الصحارى والمناطق الرطبة ، رغم الاختلاف بينهما. حيث تعمل عمليات التجوية والنقل بالطريقة نفسها ، ولكن مع اختلاف شدة كل منهما . فتسود التجوية الفيزيائية على التجوية الكيميائية فى الصحارى. وتتكون معادن الصلصال نتيجة التجوية الكيميائية للفلسبارات والمعادن السيليكاتية الأخرى ، ولكن بكميات صغيرة وببطء نتيجة نقص المياه اللازمة لذلك التفاعل ، وتذرو الرياح القوية معادن الصلصال القليلة التى تكونت ، مما يسبب عدم تكون تربة ذات سمك معقول . لذلك فإن التربة فى الصحارى تكون رقيقة ومتباعدة على هيئة بقع متباعدة .

ويسود فى العديد من المناطق الصحراوية اللون البنى الداكن ، الذى يكون طلاءً قاتما لامعا يغطى أسطح الصخور، ويتكون من خليط من معادن الصلصال مع كميات أقل من المنجنيز وأكاسيد الحديد، ويسمى هذا الطلاء الداكن **ورنيش الصحراء desert varnish** ، وهو يتكون نتيجة التجوية البطيئة لمكاشف الصخور لفترات طويلة تصل لآلاف السنين.

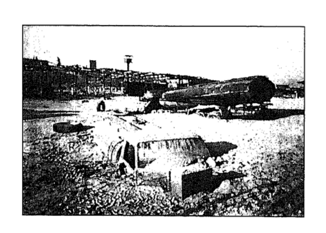
1 - المجارى المائية: عامل تعرية مهم فى الصحارى

يسود اعتقاد خاطىء بين الناس أن الصحارى تتكون فقط من امتدادات شاسعة من الكثبان الرملية ، حيث تغطى الرمال حوالى خمس مساحة الصحارى فى العالم. وعلى سبيل المثال ، فإن الرمال تغطى ثلث مساحة شبه الجزيرة العربية ، وهى تعتبر من أكثر مناطق العالم التى تتواجد بها الرمال ، بينما تغطى الرمال عشر مساحة الصحراء الكبرى فى شمال أفريقيا. وتعتبر الواحات المتناثرة بالصحارى أماكن يصل فيها منسوب الماء الجوفى (الأرضى) محليا إلى سطح الأرض ، ومن أشهر الأمثلة على ذلك الواحات المتناثرة بالصحراء الغربية المصرية مثل الواحات البحرية والفرافرة وسيوة وغيرها .

وتقطع معظم المناطق التى لا تغطيها الرمال المجارى المائية ، أو تُغطى بمراوح وسهول طميية. ولذلك فإن معظم التعرية فى كثير من الصحارى تتم نتيجة عمل المجارى المائية ، وليس بعمل الرياح.

ولا تصل معظم المجارى المائية الصحراوية إلى البحر ، وإنما تنساب فى الصحارى وتختفى بسرعة ، إما نتيجة بخر الماء أو تخللها وتسربها فى الأرض . ويستثنى من ذلك الأنهار الكبرى الطويلة مثل نهر النيل ، الذى ينشأ فى هضبة البحيرات والمرتفعات الأثيوبية الرطبة بشرق أفريقيا وينساب خلال السودان ثم مصر. ويستمر نهر النيل فى الانسياب عبر الصحارى القاحلة رغم عملية التبخير ، وينقل كمية كبيرة من الماء . وتتميز المجارى المائية فى الصحراء عموما بتباعدها عن بعضها نظرا لقلة المياه ، ولكن تتميز أنماط شبكات الصرف بها أنها تشبه مثيلاتها فى البيئات الأخرى.

ولا يمنع الغطاء النباتى المتناثر والقليل فى الصحراء من جريان الماء المتساقط على سطح الأرض. ويعمل ماء الصرف السطحى هذا على تعرية ونقل الصخور المتكسرة غير المتماسكة التى تكوّن سطح الأرض وتغطى صخر الأساس ، وتعرف بالحطام الصخرى (الأديم) regolith . ويصاحب العاصفة الممطرة الشديدة عادة **فيضان مفاجئ flash flood** محلى ، يسبب تدفق كميات ضخمة من الماء ، ويستمر لفترات قصيرة ينقل خلالها كميات كبيرة من الرواسب. ويكون الحطام الصخرى الناشئ من تلك الفيضانات مراوح عند منحدرات الجبال وعلى أرضية الوديان المتسعة والأحواض .



شكل (19.15): رواسب متراكمة من الطين والرمال فى مساحات منخفضة تغمر المركبات بقرية درنكة قرب أسيوط ، جنوب مصر ، بسبب السيول المحملة بكميات كبيرة من الرواسب والحطام الصخرى إثر سقوط الأمطار فى نوفمبر 1994م.

(After Ashour, M.M., 2002: Flash floods in Egypt (A case study of Durunka Village, Upper Egypt. Bull. Egypt. Geograph. Soc., V. 75).

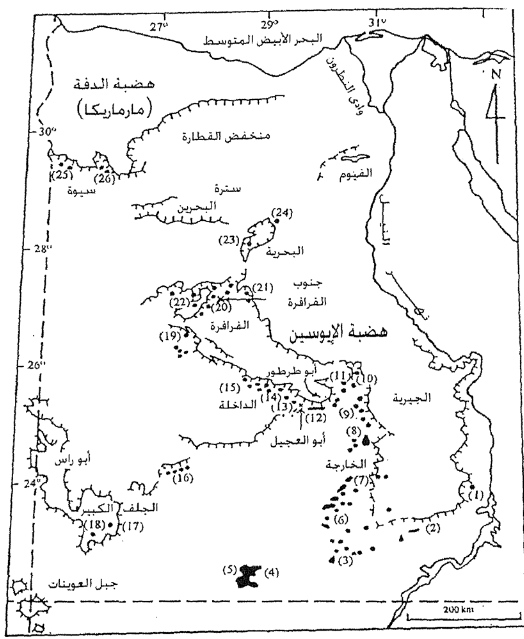
وفى مصر ، فقد تسببت الأمطار الغزيرة التى سقطت فى الثانى من نوفمبر 1994م فوق قرية درنكة ، قرب مدينة أسيوط فى حدوث سيول أدت إلى حدوث انسياب للمياه من منحدرات التلال على امتداد الوديان، نقلت التربة والحطام الصخرى ورواسب من مختلف الأحجام إلى القرية . وقد تسببت مياه السيول المحملة بكميات كبيرة من الرواسب والحطام الصخرى فى انفجار أربع خزانات للوقود بالقرية واشتعلت بها النيران ، وتسببت الغازات والحرارة فى مقتل 399 شخصا من مختلف الأعمار . كما تسببت رواسب الطين والرمال ، التى وصل سمكها إلى أكثر من متر فى الأراضى المنخفضة ، فى نفوق أعداد كبيرة من المواشى وغرق الأراضى الزراعية وتدمير أعمدة الهاتف والكهرباء بالقرية ، كما غمرت الطرق ودفنت السيارات تحت رواسب الطين والرمال (شكل 19.15) .

د – الرواسب والترسيب فى الصحارى

عندما تجف الفيضانات المفاجئة والمحملة بالرواسب ، فإنها تترك رواسب مميزة على قيعان الأودية الصحراوية ، حيث يغطى الحطام الصخرى الخشن كل أرضية الوادى دون أن تتمايز الرواسب إلى رواسب مجارى مائية وسهول فيضية وجسور طبيعية natural levees، كما يحدث عادة فى مجارى الأنهار . وقد يتكون فى عديد من الأودية الصحراوية الأخرى تداخلا بين رواسب المجارى المائية ورواسب السهول الفيضية والرواسب الريحية (الناتجة من فعل الرياح) eolian sediments .

وتعتبر الكثبان الرملية وحقول الكثبان وبحار الرمال أكثر التراكمات الرسوبية الريحية إثارة للاهتمام ، حيث تغطى الرمال حوالى خمس المساحات الصحراوية فى العالم ، بينما تغطى بقية مساحة الصحارى الرصيف الصحراوى أو الصخور. ونادراً ماتكون المياه الجارية فى المناطق القاحلة كافية بدرجة تسمح بالاحتفاظ بها لكى تكون بحيرات دائمة. وتسمى تلك البحيرات الدائمة أو المؤقتة التى تتجمع فى أودية الجبال أو أحواض المناطق القاحلة **ببحيرات البلايا playa lakes** . وقد تكون مياه بحيرات البلايا سامة نظرا لارتفاع نسبة الملوحة أو القلوية ، نتيجة للبخر أو ذوبان الأملاح بالمجارى المائية فى الصحراء . وعندما تتبخر مياه البحيرة ، فإن نواتج التجوية والتعرية الذائبة فى تلك المياه تتركز وتبدأ فى الترسب تدريجيا. وقد يكون التبخير كاملاً بحيث تصبح البحيرة جافة وتكوّن **بلايا (بحيرة جافة) playa** (من الإسبانية بمعنى شاطئ) . وقد تتراكم الأملاح البيضاء أو الرمادية عند السطح الجاف للبلايا ، والتى قد تزداد نتيجة تكرار عملية التكون والبخر إلى سمك يصل إلى عشرات الأمتار. وتعتبر البلايا من أهم رواسب المتبخرات فى البيئة الصحراوية ، وهى مصدر مهم للكيماويات الصناعية (كربونات الصوديوم) والبوراكس (بورات الصوديوم) وأملاح أخرى غير عادية.

ويوضح شكل (15. 20) توزيع البلايا القديمة بالقرب من من الواحات الكبرى فى الصحراء الغربية المصرية . ويتضح أن هناك أكثر من 100 بلايا تزيد مساحة كل منها عن كيلومترين ، وتتركز فى الجزء الجنوبى من الصحراء الغربية ، منها 25 بلايا فى الواحات الداخلة و 21 بلايا فى الواحات الخارجة و24 بلايا فى الفرافرة . كما تتواجد بعض البلايا الأخرى التى تقل مساحتها عن كيلومترين مربعين على أسطح الهضاب والوديان .



شكل (20.15): توزيع البلايا القديمة فى الصحراء الغربية المصرية .

(1) كركر ، (2) دنجل ، (3) نابتة ، (4) بير طرفاوى ، (5) بير صحارا شرق ، (6) بير مر ، (7) جبل الواقف ، (8) سهل باريس ، (9) بولاق ، (10) المحاريق ، (11) أم الدبادب، (12) سهل الزيات ، (13) بلاط ، (14) موط ، (15) غرب الموهوب ، (16) أبو بلاص ، (17) وادى بخت، (18) وادى أرض الأخضر ، (19) أبو منقار ، (20) قصر الفرافرة ، (21) بير قراوين ، (22) وادى الأبيّض ، (23) الحيز ، (24) شمال شرق البحرية ، (25) غرب سيوة ، (26) شرق سيوة .

(After Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, The Egyptian Geographic Soc., vol. , Cairo).

III معالم الأرض فى الصحارى

تتميز معالم الأرض فى الصحارى بالتنوع الشديد ، حيث تكون هناك مساحات منخفضة واسعة وممتدة ومغطاة بالرمال والكثبان وأرصفة الصحراء والبلايا ، بينما تكون الأراضى المرتفعة صخرية ويقطعها أودية أنهار عميقة أو أودية ضيقة لها جوانب شديدة الانحدار

وعظيمة الارتفاع وتكاد تكون رأسية ، تعرف بالخوانق gorges (جمع خانق) . ويؤدى نقص التربة والغطاء النباتى إلى أن تبدو المعالم الأرضية ومنظر الأرض landscape عموما أكثر حدة وقسوة من منظر الأرض فى المناخات الرطبة. فبينما تكون المنحدرات فى المناطق الرطبة مستديرة ومغطاة بالتربة وبها غطاء نباتى، فإن المنحدرات فى الصحارى تكون شديدة الانحدار ووعرة وتكوّن جروفا cliffs . وتغطى المنحدرات شديدة الانحدار كسرات صخرية غير متجانسة ومختلفة الأحجام بسبب تسوية تلك المنحدرات، بينما تتجمع كتل الركام **talus** عند قاعدة الجرف والمكون من ذلك الحطام الصخرى المتساقط من أعلى المنحدر.

وتتميز الأودية فى الصحارى بأن لها القطاع الطولى نفسه (البروفيل) للأودية فى البيئات الأخرى ، إلا أن معظم الأودية فى الصحارى تتميز بالجفاف والجوانب شديدة الانحدار، نتيجة التعرية السريعة بسبب تحرك الكتل والمجارى المائية.

ونستعرض فيما يلى أهم المعالم التى تميز الأرض فى الصحارى.

أ - المراوح الفيضية (الطمية) والبجادا (المنحدرات الطمية)

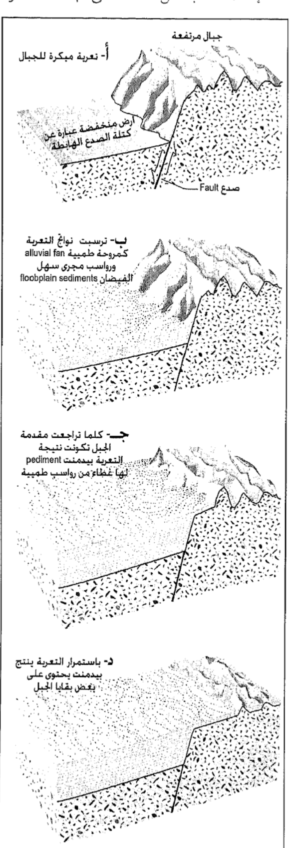
تتكون المراوح الفيضية (الطمية) فى العديد من بيئات الترسيب . ولكنها تكون شائعة فى المناطق القاحلة وشبه القاحلة ، حيث تتكون أساسا من الطمى والفتات الصخرى المنحمول فى المجارى المائية . وتتكون المراوح الفيضية (الطمية) عندما يحدث انخفاض مفاجئ فى سرعة المياه المتدفقة عبر الأخاديد الخانقة canyons التى تقطع سلاسل الجبال ، حيث تنتشر المياه الجارية على المنحدرات اللطيفة عند سفح الجبل ، وتترسب بالتالى معظم حمولة المجرى المائى خلال مسافة قصيرة ، حيث يتكون نتيجة ذلك مخروط من الرواسب عند مصب الأخدود يعرف بالمروحة الفيضية (الطمية) **alluvial fan** (شكل 24.12) . وحيث إن الحطام الصخرى الأكبر حجما يترسب أولاً، فإن رأس المروحة يكون أكثر انحداراً ، أى ما يقارب 10- 15° ، ويقل حجم الرواسب ودرجة الانحدار كلما تحركنا أسفل المروحة . حتى تتدرج مع قاع الوادى الذى يصب فيه المجرى المائى . ويوضح الفحص الدقيق لسطح المروحة الفيضية (الطميية) أن قنوات المجرى المائى على سطح المروحة يكون من النمط المجدول braided pattern ، حيث يختنق المجرى المائى بالرواسب ، مما يجعله يتفرع ويتلاقى مرات عديدة مكونا الكثير من المجارى المتعرجة . وتزيد المروحة الفيضية (الطمية) فى الحجم مع مرور الزمن ، حيث تلتحم فى النهاية مع مراوح من أخاديد متجاورة لتكون غطاء من الرواسب تسمى **بَجَادا (منحدر طميى) bajada** (من الإسبانية بمعنى منحدر) عند قاعدة الجبل ، ويكون سطحها متموجا نتيجة تحدبات المراوح التى تكونها . وقد تتكون البجادا عندما تكون الأخاديد متقاربة عند قاعدة الجبل.

ب - البيدمنت (السفوح الجبلية)

تعتبر البيدمنت (السفح الجبلى) أحد أهم الملامح الأرضية المميزة للمناطق الجافة. و**البيدمنت (السفح الجبلى) pediment** رصيف من صخر الأساس واسع ولطيف الانحدار يشكل عتبة أمام سلسلة جبال فى المناطق الجافة ، حيث تم تعرية وتراجع مقدمة الجبل من الوادى (شكل 21.15 أ و ب). وقد تتغطى بعض أجزاء البيدمنت بطبقة رقيقة من الرمل الطميى والحصى وتنحدر بعيداً عن قاعدة الأرض المرتفعة (شكل 21.15ج). ويوضح القطاع المستعرض (البروفيل) فى بيدمنت نموذجى وفى الجبال المجاورة لها، مثل القطاع المستعرض فى المروحة الطميية أن منحدر الجبال يكون شديد الانحدار ثم يستوى فجأة

فى منحدر البيدمنت اللطيف الانحدار (شكل 21.15 د).

والطريقة التى تتكون بها البيدمنت غير واضحة تماما ، إلا أن هناك بعض الأدلة على أنها قد تتكون



شكل (**21.15**): مراحل تطور بيدمنت **pediment** نموذجى ، وهو أحد أشكال التعرية فى المناطق الجبلية الجافة (القاحلة) .

أ) تتكون أرض منخفضة نتيجة التصدع

ب) تترسب نواتج التعرية مثل المراوح الطميية وسهول الفيضان فى الأراضى المنخفضة

ج) عندما تتراجع مقدمة الجبل فإن التعرية تؤدى إلى تكون بيدمنت تغطيه طبقة رقيقة من الرواسب الطميية

د) تؤدى التعرية المستمرة لفترة طويلة إلى تكون بيدمنت متسع مع بقايا من الجبل . ثم تتراجع مقدمة الجبل باطراد مع الحفاظ على زاوية انحدار حادة ، عكس مايحدث فى المناخات الرطبة ، حيث تتكون منحدرات لطيفة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

نتيجة تغيير المجارى المائية لمجراها بسبب وجود جبال فى مسارها . وتتراجع تلك الجبال فى الوقت نفسه وهى مازالت محتفظة بشدة انحدارها ، بدلاً من أن تصبح أكثر استدارة وأقل حدة فى الانحدار كما يحدث فى المناطق الرطبة .

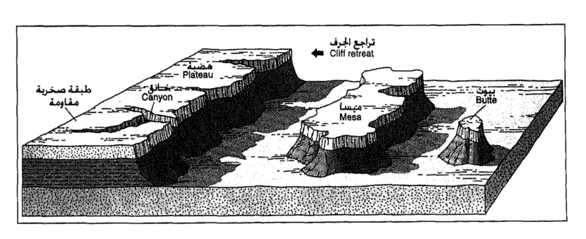
جـ. الجبال المنعزلة (الجزيرية)

الجبال المنعزلة (الجزيرية) **inselbergs** عبارة عن جبال أو تلال مفردة ناتئة وسط أرض واسعة منبسطة ، وهو مصطلح مشتق من لفظة ألمانية تعنى جبالاً جزيرية. وهى تشبه الجزر الصخرية الناتئة وسط المحيط . وتتميز بوجود قمم بارزة ، إلا أنها مستديرة ملساء وذات جوانب شديدة الانحدار تكاد تكون رأسية . وهى تنشأ فى بيئات عديدة تتراوح بين البيئة الساحلية وحتى الداخلية ، ومن البيئات الجافة (القاحلة) إلى الرطبة. ومع ذلك فإن الجبال المنعزلة تكون أكثر شيوعاً فى الأراضى شبه الجافة فى وسط القارات المستقرة تكتونيا. وتوجد أمثلة عليها فى جنوب ووسط أفريقيا وشمال غرب البرازيل ووسط استراليا.

د- الميسات (الربوات) والبيوتات (التلال النضيدية)

يتكون نتيجة طغيان البحر الضحل وانحساره تتابع من طبقات الرمل والطفل ، أو الحجر الجيرى والطفل . وعادة ما يكون الطفل صخرا ضعيفاً غير مقاوم للتعرية، بينما تكون طبقات الحجر الرملى والجيرى أكثر مقاومة نسبياً . وعندما تعمل التعرية فى مثل هذا التتابع من الصخور ، فإن طبقات الحجر الرملى أو الحجر الجيرى المقاومة للتعرية تكوّن غطاء يحمى ما تحته يعرف بصخر الغطاء cap rock، مما يؤدى إلى تكون هضبة **plateau** مستوية القمة تقريباً . وتؤدى التعرية وتراجع المنحدر على امتداد حافة الهضبة إلى تكون جروف على امتداد الطبقات المقاومة للتعرية ومنحدرات على امتداد الطبقات الضعيفة . ويعتبر هذا مثال شائع على التفاوت فى التعرية (شكل 22.15) .

ومع تقدم التعرية ، فإن جزءاً كبيراً من الهضبة يُزال لكى تتكون ميسا (ربوة) **mesa** (من الإسبانية بمعنى منضدة) ، وهى عبارة عن أرض مرتفعة تشبه المنضدة يتكون سطحها العلوى المنبسط من طبقات مقاومة للتعرية ، بينما تكون منحدراتها شديدة مثل الهضبة . وتنكمش الميسا بدورها نتيجة تراجع المنحدرات على



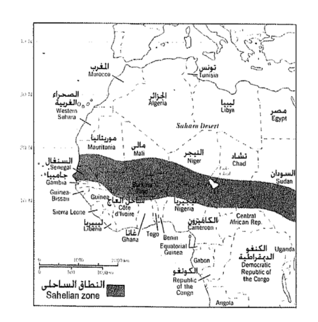
شكل (**22.15**): الهضاب والميسات (الربوات) والبيوتات . عندما يتراجع جرف عند حافة هضبة ، فإن الهضبة تترك وراءها ميسا (ربوة) mesa وتلاً نضيدياً butteكبقايا لتعرية وتآكل الهضبة .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

كل الجوانب ، لكى تكوّن بيوت (تلاً نضيديًا أو تبة) butte (من الفرنسية بمعنى تل صغير) . وتستمر التعرية فى التلال النضيدية لتتكون تلال مستدقة القمة pinnacles ، والتى تختفى فى النهاية مع استمرار التعرية.

IV. التصحر

تتعرض مناطق المناخ المدارى وشبه المدارى لسنوات من القحط المدمر ، يتبعها سنوات تتساقط فيها أمطار غزيرة قد تؤدى إلى حدوث فيضانات . وتُظهر التسجيلات المناخية أن هناك تبادلا بين فترة تدوم لسنتين أو ثلاث سنوات من القحط أو ندرة المطر وفترة أخرى قد تدوم لعدة سنوات من تساقط أمطار متوسطة أو فوق متوسطة . وهذا التغير سمة دائمة مميزة للمناخ المدارى الرطب الجاف ، حيث تتكيف النباتات والحيوانات فى تلك المنطقة مع هذا التغير الطبيعى فى معدل سقوط الأمطار ، باستثناء واحد هو الإنسان.



شكل (**23.15**): خريطة توضح الساحل Sahel أو النطاق الساحلى، والذى يمتد جنوب الصحراء الكبرى فى شمال أفريقيا.

(After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ويقع فى المنطقة جنوب الصحراء الكبرى فى شمال أفريقيا حزام من الأرض العشبية الجافة يضم عددا من الدول ، حيث يتراوح المعدل السنوى لسقوط الأمطار فى هذا الحزام من 100 إلى 300 مم ، يتساقط معظمها خلال موسم مطر واحد قصير . ويسمى هذا الحزام بالساحل Sahel أو النطاق الساحلى Sahelian zone (شكل 23.15) . وقد تعرض الساحل لأسوأ موجة قحط فى القرن العشرين (1968-1974م) ، حين لم تتساقط الأمطار لعدة سنوات متتالية مما تسبب فى امتداد الصحراء المجاورة جنوبا لمسافة وصلت أحيانا إلى 150 كم . وقد امتد القحط من المحيط الأطلنطى إلى المحيط الهندى لمسافة حوالى 6000 كم، وأثّر فى حوالى 20 مليون نسمة على الأقل ، معظمهم من الرعاة الرحل . وترجع شدة القحط إلى زيادة عدد السكان إلى الضعف خلال الفترة من عام 1935م حتى عام 1970م ، بالإضافة إلى زيادة عدد الماشية بشكل مثير . وقد أدت زيادة عدد السكان والحيوانات إلى زيادة معدل الرعى لدرجة أنه عند حدوث القحط ، فشل الغطاء النباتى الموجود فى تغطية حاجة السكان كما نفق 40٪ من الماشية التى وصلت إلى عدة ملايين . وقد عانى ملايين البشر من الظمأ والجوع بينما مات الكثير منهم وهاجر الملايين جنوبا بحثا عن الطعام والماء. وقد عاودت الأمطار السقوط فى منتصف السبعينيات . وأثرت ظروف القحط فى عام 1980م على أثيوبيا والسودان حيث انتشرت أيضاً المجاعة .

ويسمى غزو الصحراء لمناطق غير صحراوية بالتصحر. وبتفصيل أكثر فإن **التصحر** **desertification** هو التحول الدائم لسطح الأرض حتى يشبه الصحراء ، بسبب النشاط الإنسانى المدمر لحشائش الرعى والشجيرات والأشجار والرعى الجائر واستخدام أخشاب الأشجار كوقود ، بالإضافة إلى

السحب الزائد للمياه الجوفية . وقد يستخدم مصطلح التصحر بدلاً من مصطلح تدهور إنتاجية الأرض الزراعية land degradation . وقد تساعد تراكمات الرواسب فى قنوات المجارى المائية وإزالة التربة بالرياح فى عملية التصحر. كما قد ينشأ التصحر من تغييرات بيئية طبيعية تؤدى إلى الجفاف ، بالإضافة إلى النشاط الإنسانى.

وتبدأ مظاهر التصحر الرئيسية بانخفاض مستوى الماء الجوفى وزيادة ملوحتها ، وزيادة ملوحة الأجزاء العليا من التربة (التربة السطحية topsoil)، وانخفاض إمدادات الماء السطحى ، وزيادة غير عادية فى تعرية التربة وهلاك الزراعات المحلية ونفوق الماشية.

ومن المناطق التى ينتشر فيها التصحر دولة موريتانيا فى شمال غرب أفريقيا ، حيث يحاول السكان أن ينظموا أنفسهم فى مجموعات لمقاومة الجفاف . كما قام السكان بتشجير أماكن عديدة من الصحراء ، وتوزيع أنابيب غاز صغيرة ليستعينوا بها فى طهو طعامهم بدلا من قطع الأشجار واستخدامها كوقود . كما قامت الحكومة الموريتانية ببناء سدود وخزانات للمحافظة على المياه .

الملخص

1. الرياح انسياب أفقى للهواء مواز لسطح الكرة الأرضية الدوارة ، يمكنه حمل ونقل حبيبات الراسب الجافة بالطريقة نفسها التى ينقل بها الماء الجارى الراسب ، ولكن تكون انسيابات الهواء محدودة فى كل من حجم الحبيبات التى يمكن أن تحملها (نادراً ما تكون أكبر من رمل خشن الحبيبات) ، وعلى الاحتفاظ بالحبيبات معلقة لفترة طويلة نظراً لانخفاض كثافة ولزوجة الهواء . وتكون كل انسيابات الهواء مضطربة ، وتصل الرياح إلى سرعات 100 كم فى الساعة أو أكثر ، مما يزيد من قدرة الرياح على حمل الراسب معلقا .
2. يؤدى التسخين غير المتساوى للأرض بأشعة الشمس إلى الحركة الدائمة فى الغلاف الجوى ، وتجزئة دوران الهواء بين خط الاستواء والأقطاب إلى أحزمة رياح تسود بها الرياح التجارية والغربية والشرقية القطبية ، وإلى انحراف كل من انسيابات الهواء الشمالية والجنوبية والباردة والساخنة بين خط الاستواء والأقطاب . ويؤدى تأثير كوريولى إلى انحراف كل من انسيابات الهواء الشمالية والجنوبية والباردة والساخنة بين خط الاستواء والأقطاب .
3. تشمل المواد التى يمكن أن تحملها الرياح الرماد البركانى والكوارتز وحبيبات المعادن الأخرى مثل معادن الصلصال والمواد العضوية . ويمكن للرياح أن تحمل كميات ضخمة من الرمل والتراب .
4. تحرك الرياح حبيبات الرمل بالزحف السطحى والوثب بالقرب من سطح الأرض، بينما تكون حبيبات التراب معلقة عند مستويات أعلى . وتؤدى العمليات السابقة إلى فرز الراسب.
5. يقوم الهواء المنساب والمحمل بالرواسب بتعرية الأرض بطريقتى التذرية والسحج . وتؤدى العمليتان إلى نشأة أحواض التذرية وأرصفة الصحراء وتكوين الوجهريجيات والياردانج.
6. تتكون الكثبان الرملية عندما تتسبب العوائق فى انحراف انسياب الهواء ، حيث يتراكم الرمل فى جيب نتيجة انخفاض سرعة الريح المحملة بالرمال (نطاق ظل الريح) والانهيال على أوجه انزلاق حادة الانحدار . وتتكون الأنواع المختلفة من الكثبان وهى البرخان والمستعرضة والطولية والنجمية والقطع المكافئ (البارابولية) ، كاستجابة لسرعة الريح واستمرارية أو تغيير اتجاه الريح ووفرة الرمل.

وتهاجر الكثبان فى اتجاه الريح ، حيث تتكون طبقات كاذبة تميل فى اتجاه الريح .

7. تترسب اللويس أساسا بالرياح من الصحارى ومن السهول الفيضية لمجارى المياه المتكونة من انصهار الثالج . وتتكون رواسب اللويس من التراب المكون فى معظمه من الغرين والصلصال وبعض الرمل الناعم .

8. تكون الصحارى الحارة حوالى 30 ٪ من مناطق العالم ، باستثناء المناطق القطبية ، وهى مناطق تتميز بقلة سقوط الأمطار وارتفاع درجة الحرارة وزيادة البخر ، والرياح القوية نسبياً، وغطاء نباتى غير كثيف ومتفرق .

9. تسود التجوية الفيزيائية فى الصحارى ، حيث تعتبر مع الفيضانات المفاجئة والرياح عوامل تجوية مؤثرة فى تلك المناطق .

10. تشمل المعالم الأرضية فى الصحارى المراوح الطميية والبجادا والبيدمنت والجبال المنعزلة (الجزيرية) والميسات (الربوات) والتلال النضيدية والتلال مستدقة القمة ، والتى تتكون نتيجة تعرية تتابع من الطبقات الأفقية .

11. قد يتسبب تكرر حدوث القحط فى انخفاض منسوب الماء الأرضى وارتفاع معدل تعرية التربة وتدمير الغطاء النباتى ، مما يؤدى إلى غزو الصحارى للمناطق المجاورة غير الصحراوية. وتؤدى زيادة الرعى والسحب الزائد للمياه الأرضية وقطع الأشجار لاستخدامها كوقود ، بالإضافة إلى بقية أنشطة الإنسان ، إلى التعجيل بحدوث التصحر .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.unccd.ch/
http://www.desertusa.com/
http://arizona.usgs.gov/Flagstaff
http://www.nps.gov/moja/mojadewd.htm
http://www.mrdowling.com/611-deserts.html

المصطلحات المهمة

abrasion	برى (سحج)	parabolic dune	كثيب قطع مكافئ (بارابولى)
alluvial fan	مروحة طميية	pediment	بيدمنت (سفح جبلى)
bajada	بجادا	pinnacle	تل مستدق القمة
barchan dune	كثيب برخان (ج. برخانات)	plateau	هضبة
blowout dune	كثيب انطلاق	playa	بلايا (بحيرة جافة)
butte	بيوت (تل نضيد)	playa lake	بحيرة بلايا
Coriolis effect	تأثير كوريولى	rain shadow desert	صحراء ظل المطر
deflation	تذرية	sandblasting	سفع الرمال
desert	صحراء	sand dune	كثيب رملى
desert pavement	رصيف صحراوى	sand ripple	نيم الرمال (مويجات الرمال)
desert varnish	ورنيش الصحراء	sand sea	بحر الرمال
desertification	تصحر	slip face	وجه انزلاق
eolian	ريحى	star dune	كثيب نجمى
flash flood	فيضان مفاجئ	transverse dune	كثيب مستعرض
inselberg	جبل منعزل (جزيرى)	ventifact	وجهريحية
linear dune	كثيب طولى	yardang	ياردانج (حيد ريحى)
loess	لويس		
mesa	ميسا (ربوة)		

الأسـئلة

1- اذكر العوامل الجوية التى تجعل معظم الصحارى الحارة الكبرى فى العالم تتركز فى أحزمة تقع بين خطى عرض 20 ° و 30° شمال وجنوب خط الاستواء.

2- ما العامل الذى يحدد العمق الذى تكون التذرية مؤثرة عنده ؟

3- اذكر لماذا تكون تأثيرات التعرية نتيجة هبوب الرمال محصورة عموماً فى نطاق يرتفع حوالى متر ابتداء من سطح الأرض.

4- كيف يمكننا استنتاج اتجاه الريح السائد فى الماضى من الشكل والتطبق الداخلى لكثيب رملى قديم غير نشط ، ومن وجهريجية ، ومن راسب تفرا ؟

5- ماحجم الحبيبات التى يمكن أن تحركها الريح؟

6- كيف يمكن التمييز بين راسب من اللويس وراسب رماد بركانى لهما حجم الحبيبات نفسه ؟

7- لماذا تميل منحدرات التلال فى المناطق الجافة لأن تكون حادة وشديدة الانحدار عن تلك التى توجد فى المناطق الرطبة؟

8- اذكر الارتفاعات التى يمكن أن تُحمَل إليها حبيبات الرمل والتراب فى الغلاف الجوى، واشرح أوجه التشابه والاختلاف بينهما.

9- اذكر أسماء ثلاثة أنواع من الكثبان الرملية مع توضيح علاقتها باتجاه الريح.

10- مامعالم الأرض فى الصحراء التى يمكنك أن تعتقد أنها تكونت أساسا بواسطة المجارى المائية، مع إسهامات ثانوية من عمليات الريح؟

11- أيهما أفضل : التطبق المتقاطع أم اتجاه شكل الكثيب على الخريطة لاستنتاج اتجاه الريح التى كونت كثيبًا برخانيًا؟ ولماذا؟

12- اذكر بعض مظاهر التصحر ، وما العوامل التى تساعد على عملية التصحر؟

13- كيف يتكون البيدمنت؟

14- كيف يمكن أن تختلف التجوية فى الصحراء عنها فى المناخات ذات الرطوبة الأعلى؟

الفصل

16 الزلازل وتركيب الأرض

I. الزلازل

أ. نشأة الزلازل

ب. دراسة الزلازل

1. السيزموجراف (مسجل الزلازل)

جـ. الموجات الزلزالية

1. الموجات الأولية
2. الموجات الثانوية
3. الموجات السطحية

د. قياس شدة وقدر الزلزال

1. شدة الزلزال
2. قدر الزلزال

هـ. الدمار الناشىء عن الزلزال

و. تحديد نوع التصدع من نتائج الزلزال

II. توزيع الزلازل حول العالم

III. الزلازل وتكتونية الألواح

أ. الأحزمة الزلزالية عند حدود الألواح

1. الزلازل الضحلة البؤرة عند الحواف المتباعدة
2. الزلازل الضحلة البؤرة عند حواف الصدوع الناقلة
3. الزلازل العميقة البؤرة عند الحدود المتقاربة
4. الزلازل الضحلة البؤرة داخل الألواح

VI. توقع الزلازل

أ. توقع الزلازل على أساس إحصائى

ب. توقع الزلازل على أساس فيزيائى

جـ. توقع الزلازل على أساس بيوفيزيائى

V. استكشاف باطن الأرض باستخدام الموجات الزلزالية

أ. انتقال الموجات الزلزالية فى الأرض

ب. اكتشاف التركيب الداخلى للأرض

1. القشرة

2. الوشاح

3. اللب

4. اللب الداخلى

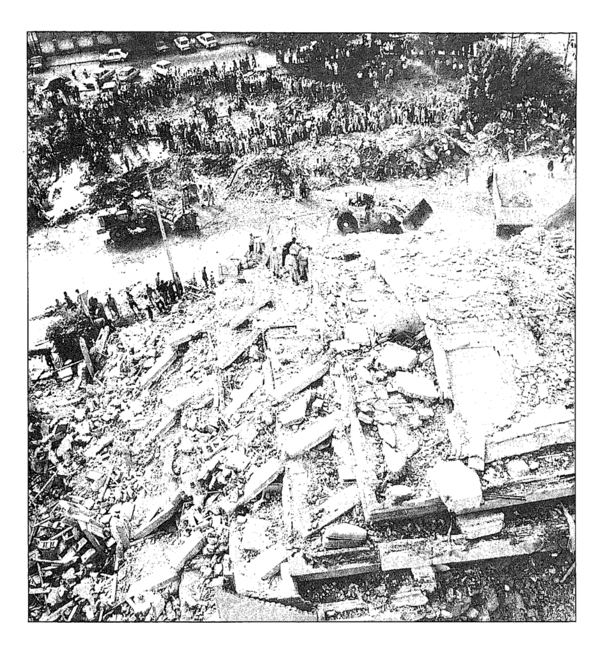
جـ. الطبقات مختلفة الخصائص الفيزيائية فى الوشاح

VI. الجاذبية الأرضية وتوازن القشرة الأرضية

أ. قاعدة توازن القشرة الأرضية

حين تحدث الزلازل تتحرك الأرض تحت أقدامنا ، فتنطلق الطاقة من باطنها وتعمل على تغيير شكل سطح الأرض وتدمر المدن وتقتل أعدادا كبيرة من البشر. وقد تكون بعض الزلازل عنيفة لدرجة أن الطاقة الناشئة عنها تساوى الطاقة المنبعثة من آلاف القنابل الذرية المنفجرة فى الوقت نفسه. ومن المعروف أن الزلازل لا تسبب قتل البشر مباشرة ، وإنما تعمل على هدم المبانى التى تؤدى إلى قتلهم . ويلاحظ أن معظم التقارير القديمة عن الزلازل غير كاملة ، حيث تورد تلك التقارير تفسيرات للزلازل ، بدلاً من وصفها بدقة . وتعتمد معظم التفسيرات القديمة للزلازل والتى وردت قبل أكثر من 2000 عام على أفكار أرسطو ، والتى كانت تقوم على أساس أن الزلازل تحدث نتيجة الرياح المندفعة تحت سطح الأرض.

ولم تطبق الطريقة العلمية فى دراسة الزلازل حتى وقت قريب . ففى القرن الثامن عشر كانت البرتغال ، وخاصة مدينة لشبونة العاصمة ، بلداً غنيا ، ولكن بدأت الأحوال تسوء فيه بسبب فعل الزلازل . ففى صباح أول نوفمبر عام 1755م ، وبينما كان هناك احتفال دينى فى مدينة لشبونة والكنائس ممتلئة بالمحتفلين ، وفى حوالى الساعة التاسعة وأربعين دقيقة صباحاً ، بدأ صوت كالرعد من تحت الأرض ، أعقبه هزة أرضية عنيفة استمرت لمدة دقيقتين أو ثلاث دقائق سببت دماراً واسعاً للمنازل والكنائس والمبانى العامة فى تلك المدينة التى كان يقطنها حوالى ربع مليون نسمة. حيث تهدمت معظم المبانى فى الطرقات الضيقة لتقتل آلاف البشر المحاصرين ، كما سقطت الستائر على الشموع والمصابيح لتشتعل النيران لمدة ستة أيام . وقبل مرور ساعة على هذا الحدث الجلل اهتزت مدينة لشبونة مرة أخرى بفعل زلزال ثان أكثر قوة وعنفاً ولكن مدته أقل من الزلزال الأول . وقد اندفع الكثير من السكان الباقين على قيد الحياة والمذعورين إلى الشاطئ الأكثر أمناً ، ولكن اندفعت أمواج البحر التى سببها الزلزال والتى وصل ارتفاعها إلى أكثر من عشرة أمتار لتحصد أرواح السكان الفارين . كما تدفقت المياه لتغطى اليابسة لمسافة وصلت إلى أكثر من نصف كيلومتر وحملت القوارب والسفن المحملة بالبضائع . وعندما تراجعت مياه البحر سحبت معها البشر والحطام إلى البحر. ثم تعرضت لشبونة فى مساء نفس اليوم لهزة أخرى حدثت على بعد 550 كيلومتر من مدينة فاس بالمغرب تسببت فى الكثير من الإصابات ، بالإضافة إلى التدمير الشديد لمناطق شمال أفريقيا . حيث دمرت مدينة فاس وغيرها من المدن الأصغر فى المغرب والجزائر . وقد أدت أول هزتين أرضيتين فى لشبونة إلى قتل حوالى سبعين ألف نسمة وحطمت حوالى 90 ٪ من المبانى ، بينما لم تسبب الهزة الثالثة سوى ذعر السكان الناجين . وقد امتد تأثير زلزال لشبونة لمدى أكبر من مجرد تدمير المدينة ، حيث أفادت الدراسات أن أكثر من 3 ٪ من سطح الأرض قد اهتز ، وتعرضت المبانى الواقعة على بعد حوالى 600 كيلو متر من بؤرة الزلزال للتدمير ، كما ارتطمت أمواج البحر العاتية الناشئة عن الزلزال بشواطئ البرتغال وشمال أفريقيا والجزر البريطانية وهولندا . وتدل القياسات الحديثة أن هذا الزلزال ربما كان يصل إلى حوالى 8.7 على مقياس ريختر .



شكل (**1.16**): انهيار بعض المبانى بالقاهرة نتيجة الزلزال الذى تعرضت له مدينة القاهرة الكبرى بمصر يوم 12 أكتوبر عام 1992م.

وقد تعرضت مدينة القاهرة الكبرى (محافظات القاهرة والجيزة والقليوبية) فى تمام الساعة الثالثة عصر يوم 12 أكتوبر عام 1992م لزلزال استمر لحوالى دقيقة تقريبا وبلغت شدته حوالى 5.8 على مقياس ريختر. وقد تسبب هذا الزلزال فى قتل حوالى 500 شخص وتدمير عديد من المنازل بالأحياء المختلفة (شكل 1.16)، كما امتد تأثير الزلزال إلى بعض المبانى الأثرية الإسلامية بالقاهرة.

وتحدث الزلازل عموماً نتيجة انطلاق طاقة المرونة المختزنة فى باطن الأرض. وتوجد معظم الزلازل عند حدود الألواح أو بالقرب منها، وهى الحدود التى سبق تحديدها أثناء مناقشة تكتونية الألواح

فى الفصل الأول . كما يوجد الكثير من الزلازل أيضا فى المناطق المستقرة تكتونيا بعيداً عن حدود الألواح فى القشرة الأرضية ، ولكنها تكون قليلة الحدوث عادة .

وفى الحقيقة ، فليست الزلازل شرا دائما . حيث تعتبر الزلازل وسيلة مهمة من وسائل الحصول على المعلومات عن طريقة عمل الأرض . كما تستخدم الزلازل لدراسة الأجزاء الداخلية من الأرض أيضا ، حيث إن الطريقة التى تهتز بها الأرض عقب الهزات الكبيرة تعتمد أساساً على صفات ونوعية الصخور داخل الأرض . وتشبه هذه الطريقة ، استخدام الطبيب للأشعة السينية لفحص جسم الإنسان من الداخل ، فالزلازل هى أدوات نستخدمها لدراسة الأرض من داخلها. وسنستعرض فى هذا الفصل تعريف الزلازل ، وأسباب وأماكن حدوثها وشدتها ، ولماذا تحدث فى مناطق بعينها ، بالإضافة إلى استخدام الزلازل فى دراسة باطن الأرض.

ا. الزلازل

عندما تهتز الأرض ، فكأنها قد ضُربت بمطرقة ضخمة . ويرجع السبب فى هذا الاهتزاز إلى الانطلاق المفاجئ للطاقة المختزنة فى الصخور عندما تزيد عن حد المرونة وتتشوه الصخور بالكسر . وتنطلق الطاقة عندئذ فى ثلاث صور (1) طاقة اهتزاز (موجات زلزالية)، (2) طاقة وضع تتحرك بسببها أجزاء من الأرض ، (3) طاقة حرارية نتيجة الاحتكاك . وكلما زادت كمية الطاقة المنطلقة كلما زادت قوة الزلزال .

ويمكن فهم كيفية حدوث الزلازل ، بأن نقوم بطَرق سطح منضدة خشبية عند أحد طرفيها بينما نضع يدنا على طرفها الآخر ، فإننا نشعر بحدوث ذبذبات نتيجة انتقال الطاقة التى سببها طرق سطح المنضدة وانتقالها إلى اليد بواسطة الذبذبات المرنة خلال الخشب على امتداد المنضدة . وتعنى كلمة زلزال **earthquake** اهتزاز الأرض وتذبذبها. وقد تحدث الزلازل نتيجة نشاط بركانى أو تصادم النيازك الساقطة من السماء بسطح الأرض أو الانهيارات الأرضية تحت سطح البحر أو الانفجارات النووية ، ولكن أكثر أسباب الزلازل شيوعاً هو التحرك المفاجئ للأرض على امتداد الصدوع . والصدع هو كسر فى الأرض تتحرك الصخور على جانبيه بمحاذاة بعضها البعض .

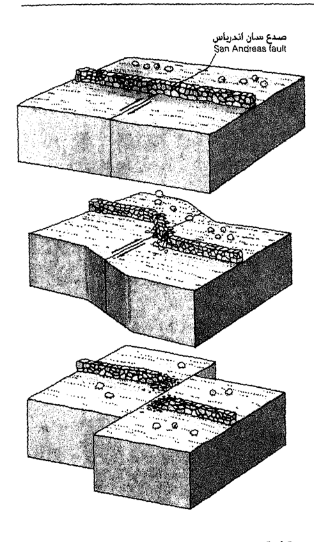
وتعتبر نظرية الارتداد المرن أكثر النظريات قبولاً لتفسير أسباب حدوث الزلازل . وقد وُضعت هذه النظرية بناءا على الدراسة التفصيلية لصدع سان أندرياس والذى حطم مدينة سان فرانسيسكو عام 1906م ، وهو صدع مضربى الانزلاق بين لوح شمال أمريكا ولوح المحيط الهادئ .

أ. نشأة الزلازل

يبدو أن التحرك المفاجئ على امتداد الصدوع هو السبب فى معظم الزلازل ، إلا أن الأمر ليس بتلك البساطة ، فبعض الزلازل قد تكون أقوى ملايين المرات من زلازل أخرى . ويرجع السبب فى ذلك إلى أن الطاقة نفسها التى تنطلق نتيجة آلاف الانزلاقات البسيطة والزلازل الضعيفة ، يمكن أن تختزن فى حالة أخرى لتنطلق فى زلزال واحد ضخم . فطبقا **لنظرية الارتداد المرن elastic rebound theory** فإنه إذا لم تنزلق أسطح الصدع بسهولة بمحاذاة بعضها البعض، فإن الطاقة قد تختزن فى أجسام الصخر المشوهة تشوها مرنا مثلما يحدث عند ضغط زنبرك من الصلب . وعندما ينزلق الصدع أخيرا ، فإن الجسم الصخرى المشوه تشوها مرنا يرتد إلى شكله الأصلى .

ولتخيل ما يحدث فى زلزال ما ، وطبقاً لتلك النظرية، فعند وجود صدع بين كتلتين من صخور

القشرة الأرضية ، وإذا لم تنزلق الكتلتان على سطح الصدع بالنسبة لبعضهما البعض بسهولة ، فإن الاحتكاك بين الكتلتين قد يتسبب فى قفل locking تلك الصخور ببعضها ، كما يمنع الحركة على امتداد الصدع لسنوات أو حتى عدة عقود (شكل 2.16) . وخلال عدة سنوات ، ونتيجة استمرار عملية دفع كتل الصخور فى اتجاهين متضادين ، تختزن الصخور الموجودة على امتداد الصدع الطاقة الناتجة من حركة الألواح ، حيث تكون تلك الصخور مجهدة ومشوهة تشوهاً مرناً elastically deformed ، أو تنحنى ببطء . ويتم فى النهاية التغلب على الاحتكاك ، عندما تصل الصخور إلى حد المرونةelastic limit وتتكسر . ويؤدى تكسر الصخور إلى انطلاق طاقة المرونة المتراكمة فى الصخور ، والتى تتحرك فجأة على امتداد الصدع ، مما يؤدى إلى حدوث الزلزال . ويوضح شكل (2.16) أن كتلتا الصخر قد ارتدتا بعد حدوث الزلزال، أى عادتا إلى شكلهما الأصلى قبل التشوه واختفى انحناء الصخر .



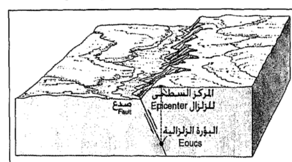
شكل (**2.16**): زلزال حدث نتيجة لانطلاق مفاجىء للطاقة . وقد تم وضع الشكل بناءً على دراسات مساحية بالقرب من صدع سان أندرياس ، كاليفورنيا ، قبل وبعد الحركة المفاجئة التى سببت زلزال **1906** م . ويوضح الشكل حائط من الحجر يقطع الصدع ، وقد انحنى الحائط ببطىء نتيجة تشوه الصخر تشوها مرنا . وقد ابتعد جزءا الحائط عن بعضهما سبعة أمتار بعد الصدع ، كما أن كتلتى الصخر قد ارتدتا بعد حدوث الزلزال ، أى عادتا إلى شكلهما الأصلى قبل التشوه واختفى انحناء الصخر .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتحدث حركة كتلتى الصدع فى مجموعة من التحركات القصيرة التى تبدأ عند البؤرة (الزلزالية) **focus** (نقطة الكسر الأولى) وتتحرك على امتداد الصدع ، حيث تنشأ من الطاقة موجات زلزالية تنتشر للخارج من البؤرة الزلزالية لتسبب اهتزاز الأرض . وتقع البؤرة الزلزالية فى أعماق الأرض وتحت سطح الأرض ، وهى تمثل النقطة التى تبدأ عندها حركة الصدع وانزلاق الكتلتين . وتسمى النقطة التى تقع فوق البؤرة الزلزالية مباشرة فوق سطح الأرض بالمركز السطحى للزلزال **epicenter** (شكل 3.16) . وعموماً ، فإنه من الأجدر عند وصف بؤرة الزلزال تحديد المركز السطحى للزلزال وعمقه .

وتقع معظم الزلازل فى صخور الغلاف الصخرى القصفة . وكما أوضحنا فى الفصل العاشر فإن التقصفbrittleness هو قابلية المواد الصلبة لأن تتكسر نتيجة زيادة الإجهاد عن حد المرونة . وفى الأعماق البعيدة عن سطح الأرض تكون درجات الحرارة والضغط عاليين مما يسبب تشوه الصخور

تشوهاً لدنا . ولذلك ، تشبه الصخور عند تلك الأعماق المعجون ، ويتغير شكلها تغيراً دائماً يبقى بعد زوال القوى التى تسبب التشوه ، ولذلك فإن الزلازل ظاهرة توجد فى الجزء الخارجى القصف من القشرة الأرضية .



شكل (3.16): البؤرة الزلزالية focus هى موقع الحركة الأولى على الصدع ، وهى مركز انطلاق الطاقة ، أما المركز السطحى للزلزال epicenter فهو النقطة التى تقع فوق البؤرة الزلزالية مباشرة فوق سطح الأرض.

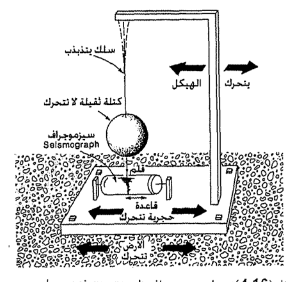
ب. دراسة الزلازل

يسمى العلم الذى يهتم بدراسة الزلازل وتركيب الأرض باستخدام الموجات الزلزالية **بعلم الزلازل** **seismology** وهى كلمة مشتقة من المصطلح اليونانى القديم seismos بمعنى زلازل .

1. السيزموجراف (مسجل الزلازل)

يسمى الجهاز المستخدم فى تسجيل هزات وذبذبات الأرض الناتجة عن الزلازل **بالسيزموجراف** (مسجل زلازل) **seismograph**. ويعرف السجل الذى نحصل عليه من السيزموجراف بالسيزموجرام (السجل السيزمى) seismogram ، وهو من أهم الوسائل لدراسة الزلازل والكشف عن باطن الأرض . ويمثل السيزموجراف للجيولوجى ما يمثله التليسكوب لعالم الفلك، حيث يعتبر وسيلة لرصد الأماكن التى لا يمكن الوصول إليها . والطريقة المثلى لتسجيل ذبذبات الأرض ، هى أن نضع السيزموجراف فوق جزء ثابت من الأرض ، ليهتزا معاً كنظام واحد عند وصول الموجات الزلزالية إليها ، حيث يمكن تسجيل حركة الأرض الناشئة عن وصول الموجات الزلزالية إليها .

ومعظم أجهزة السيزموجراف تستفيد من ظاهرة **القصور الذاتى inertia** ، وهى مقاومة كتلة كبيرة ثابتة للحركة المفاجئة . فإذا علقنا كتلة من الحديد فى زنبرك خفيف ثم حركنا الزنبرك فجأة ، فإننا نلاحظ أن كتلة الحديد تبقى ثابتة تقريباً نتيجة القصور الذاتى ، بينما يتمدد الزنبرك ، وهذه هى القاعدة المستخدمة فى السيزموجراف. ويمكن ملاحظة تلك الظاهرة عند توقف سيارة فجأة ، حيث يستمر جسم راكب السيارة فى الحركة للأمام . وتقاس الحركة الرأسية للموجات الزلزالية بتعليق كتلة ثقيلة فى زنبرك مثبت فى إطار يستقر على الأرض ، وعندما تهتز الأرض يتمدد الزنبرك وينكمش بينما تبقى الكتلة المعلقة ثابتة تقريبا بسبب القصور الذاتى . وتسجل الإزاحة الرأسية على شريط من الورق أمامه قلم ، وهذه الإزاحة عبارة عن الفرق بين حركات الإطار والكتلة المعلقة .



شكل (4.16): عمل سيزموجراف seismograph بسيط . عندما تتحرك الأرض يتحرك هيكل السيزموجراف ويتذبذب بالتالى السلك المعلق منه ، بينما تبقى الكتلة الثقيلة المعلقة والقلم المتدلى منها ثابتة تقريبا ، ويرسم القلم بالتالى خطا فوق لوح الورق أسفله يتناسب مع حركة الأرض .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

كما تقاس الإزاحة الأفقية بطريقة مشابهة ، حيث تُعلّق كتلة ثقيلة فى مفصلة مثبتة فى الإطار . ويمكن للسيزموجراف الذى علقت كتلته الثقيلة فى إطار يتحرك ، من تسجيل الحركات الأفقية للأرض (شكل 4.16) . وتستخدم فى أجهزة السيزموجراف الحديثة تكنولوجيا إلكترونية متقدمة تعمل على تكبير ذبذبات الأرض قبل تسجيلها.

ج . الموجات الزلزالية

تطلق الأرض عندما تهتز طاقة فى صورة **موجات زلزالية seismic waves** ، تنطلق من البؤرة الزلزالية عبر القشرة الأرضية لتصل إلى السيزموجراف على هيئة **موجات داخلية (جسمية)body waves** تنتقل فى جسم الأرض بالكامل . وتتداخل الموجات الداخلية (الجسمية) المنعكسة من سطح الأرض مع تلك القادمة من أسفل لتكون **موجات سطحية surface waves** تتحرك بالقرب من سطح الأرض فقط . والموجات الداخلية هى الأسرع ، وتشمل موجات أولية وموجات ثانوية.

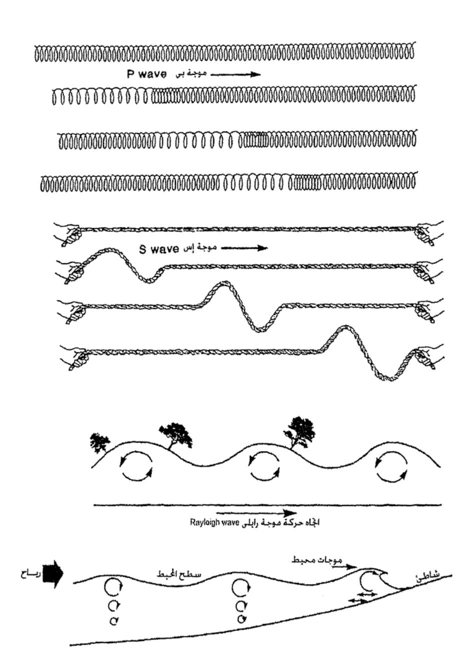
1. الموجات الأولية

الموجة الأولية primary wave أو موجة بى (P wave) هى الموجة الأسرع والأسبق فى الوصول إلى محطة التسجيل . وتتحرك الموجات الأولية فى نظام دفعي- جذبى push –pull fashion للذبذبات ، حيث تتبادل التضاغطات (دفع) مع التخلخلات (جذب) مثل موجات الصوت فى الهواء ، وتشبه الموجات الأولية فى حركتها لعبة السلك الزنبركى التى تشد من طرف واحد (5.16 أ) . وتتحرك الموجات الأولية فى جميع المواد الصلبة والسائلة والغازية ولكنها لاتتحرك فى الفراغ . وتتسبب الموجات الأولية فى دفع أو جذب جزيئات المادة فى اتجاه حركة الموجة . وهكذا فإن المواد التى تمر خلالها تلك الموجات تتمدد وتنضغط (أى تتحرك للأمام والخلف) نتيجة حركة الموجات خلالها ، وتعود إلى شكلها الأصلى بعد مرور الموجات . وكلما زادت الكثافة والمقاومة للتضاغط ، كلما زادت سرعة الموجات الزلزالية التى تمر فى النظام الذى الداخلى للمواد . وتبلغ سرعة الموجات الأولية فى الجزء العلوى من القشرة الأرضية حوالى 6 كم/ الثانية ، حيث تزداد كثافة الصخور ، بينما تنخفض السرعة فى الماء إلى حوالى 1.5 كم/ الثانية . وتستطيع الموجات الأولية التحرك فى الهواء ، حيث تشبه موجات الصوت كما ذكرنا سابقاً .

2. الموجات الثانوية

تلى الموجاتُ الأولية **الموجات الثانوية secondary waves** أو موجة إس (S wave) فى الوصول إلى السيزموجراف . وتعرف الموجات الثانوية بأنها موجات قصshear waves حيث إنها موجات مستعرضة تسبب اهتزاز جزيئات المواد التى تمر خلالها فى اتجاه عمودى على اتجاه انتشارها . وتشبه حركة الموجة الثانوية حركة الحبل الذى يهز أحد طرفيه لأعلى وأسفل (شكل 5.16 ب) . وتتسبب تلك الموجات فى حدوث إجهادات قص فى المواد التى تمر خلالها ، حيث تتشوه المواد التى تمر خلالها تلك الموجات ولا تعود إلى شكلها الأصلى إذا تعدى الإجهاد حد المرونة . وحيث أن معامل تماسك السوائل والغازات يساوى صفرا ولاتملك السوائل والغازات تلك المرونة التى ترتد بها إلى الشكل الأصلى ، فإن الموجات الثانوية (موجات القص) لا تنتقل إلا فى المواد الصلبة فقط ولاتمر فى السوائل أو الغازات . وتبلغ سرعة الموجات الثانوية فى صخور الجزء العلوى من القشرة الأرضية (مثل صخر

الجرانيت) حوالى 3.5-4 كم/ الثانية ، بينما تتوقف تلك الموجات الثانوية الرأسية والأفقية اهتزاز سطح الأرض
الموجات عند مرورها فى الماء. وتسبب حركات وبالتالى حدوث دمار للمبانى .



شكل (**5.16**): أنواع الموجات الزلزالية:

أ) موجات بى وتنشأ من حركة تضاغط وتمدد لفات الزنبرك

ب) موجات إس وتنشأ من الحركة لأعلى وأسفل عمودية على اتجاه الحركة ، وهى تشبه حركة الحبل الذى يُهَز أحد طرفيه لأعلى ولأسفل .

ج) موجات رايلى **Rayleigh waves** وتحدث فى هيئة دورانية (إهليجية) إلى الخلف .

د) حركة موجات الماء الناشئة عن الرياح تكون دورانية أيضا ولكن إلى الأمام.

ter Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

وتسلك الموجات الزلزالية الداخلية (الجسمية) سلوك موجات الصوت والضوء ، فى أنهما يحتاجان لوسط ينتقلان خلاله ، وكذلك لأن لهما القدرة على الانعكاس reflection والانكسار refraction . فالموجات الداخلية تنعكس على عديد من الأسطح الفاصلة بين الأوساط الصخرية داخل الأرض ، كما أنها تنكسر عندما تتغير سرعة الموجات نتيجة انتقالها من وسط إلى وسط آخر مختلف فى الكثافة ، حيث تغير تلك الموجات مسارها . كما قد يحدث التغير فى سرعة الموجات وانكسارها إما بشكل تدريجى أو مفاجىء .

وتعتمد سرعة الموجات الداخلية على كثافة الوسط الذى تمر خلاله تلك الموجات . فإذا كان تركيب الأرض متجانسا وكانت الكثافة تزداد تدريجيا مع العمق نتيجة زيادة الضغط، فإن الانكسار يسبب انحناء مسار الموجات الزلزالية . وقد أوضحت القياسات أن مسار الموجات يكون منحنيا فعلاً نتيجة الانكسار التدريجى ، كما أن الموجات الزلزالية تنعكس أيضاً وتنكسر نتيجة وجود عدة نطاقات تختلف فيها الكثافة بشكل مفاجئ ، مثل الحد الفاصل بين اللب والوشاح.

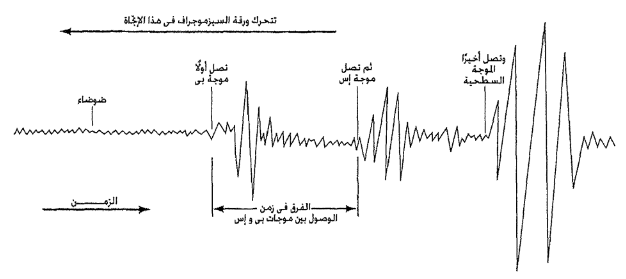
3. الموجات السطحية

تشمل الموجات السطحية التى تنتقل عبر سطح الأرض أو بالقرب منه عدة أنواع ، أهمها: موجات لف وموجات ريلى . وتنشأ الموجات السطحية نتيجة تداخل الموجات الداخلية (الجسمية) والمنعكسة من سطح الأرض مع تلك القادمة من أسفل ، مما يسبب اضطراب السطح . ويمكن تخيل هذه الأنواع من الموجات الزلزالية إذا ألقينا بحجر فى الماء ، ولاحظنا الموجات الصغيرة الدائرية التى تنشأ حول نقطة سقوط الحجر (والتى تشبه المركز السطحى الزلزال) . وتعرف كل من موجات لف وموجات ريلى بموجات- L (L waves) لأنها موجات طويلة long waves . وتكون الموجات السطحية أبطأ عموما من الموجات الداخلية (الجسمية) ، حيث تصل تلك الموجات إلى محطة الرصد بعد الموجات الأولية والثانوية.

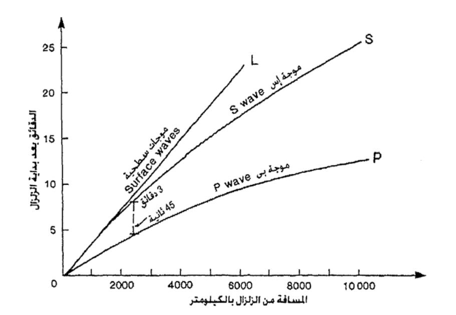
موجات لف : يمكن تعرف موجات لف على السيزموجرام ، وهى الموجات التى تعرف عليها عالم الرياضيات البريطانى لف A.. E. H. Love . وتشبه حركة تلك الموجات حركة الموجات الثانوية ماعدا أنها تنتقل من جانب إلى آخر فى مستوى أفقى تقريباً مواز لسطح الأرض . وكما هو الحال فى موجات القص S ، تكون حركة الجزئيات بالاهتزاز أو القص فى اتجاه عمودى على اتجاه الحركة للأمام (شكل 5.16ب) ، ولكن فى مستو مواز لسطح الأرض (يهتز الحبل من اليمين إلى اليسار) . وعموماً تنتقل موجات لف أسرع من موجات ريلى ولا تنتقل موجات لف خلال الماء او الهواء مثل موجات إس .

موجات ريلى: سميت تلك الموجات باسم العالم البريطانى لورد ريلى Lord Rayleigh، وتتحرك تلك الموجات فى حركة دورانية إهليلجية (بيضاوية) للخلف (شكل 5.16 ج) ، مثل حركة جزيئات الماء فى الموجات الناشئة بواسطة الرياح ، ماعدا أن حركة الأمواج فى الماء تكون دورانية للأمام (شكل 5.16 د). ويتسبب الاهتزاز بواسطة موجات ريلى فى حركة رأسية وأخرى أفقية، وكلما كانت بؤرة الزلزال أقرب إلى السطح ، زادت طاقة موجات إس و بى والتى تضرب السطح ، وبذلك تزداد طاقة موجات ريلى . وتنتقل موجات ريلى فى المواد الصلبة والماء.

تحديد موقع الزلزال: تنتقل الموجات الزلزالية المختلفة بسرعات مختلفة ، ولذلك فإنها تصل إلى السيزموجراف فى أزمنة مختلفة . ويوضح شكل (6.16) الأنماط المميزة والمسجلة للموجات الزلزالية المختلفة . وأول الموجات الزلزالية وصولا إلى السيزموجراف وأسرعها هو الموجات الأولية التى



شكل (6.16): السجل الزلزالى لزلزال تايوان سنة 1967م ، والذى كانت شدته 6.2 مسجلا فى بيركيلى – كاليفورنيا على بعد 6300 ميل . ويوضح السجل الموجات التى وصلت فى البداية من نوع P ثم تليها S ثم الموجات السطحية ، وهى آخر الموجات وصولا إلى السيزموجراف.



شكل (7.16):العلاقة بين الزمن والمسافة للموجات الزلزالية كما توضحها منحنيات زمن الانتقال time - distance curves. ويلاحظ أن الفرق فى زمن الوصول بين الموجات P و S هو ثلاث دقائق و45 ثانية ، وهى تساوى – كما يظهر على الشكل الذى يمثل زلزالا فى روسيا عام 1909م – حوالى 2250 كم .

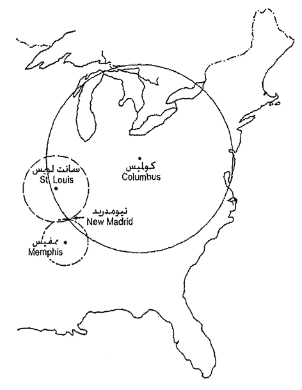
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

تنتقل بسرعة تبلغ ضعف الموجات الثانوية تقريباً ، التى تليها فى الوصول . وتنتقل كل من موجات إس وموجات بى مباشرة من بؤرة الزلزال إلى السيزموجراف عبر جسم الأرض الداخلى . وآخر الموجات وصولا إلى السيزموجراف هو الموجات السطحية (موجات لف ثم موجات ريلى) حيث إنها أبطأ الموجات الزلزالية . كما أنها تنتقل عبر مسار أطول على امتداد سطح الأرض .

وقد تمكن العاملون فى مجال الزلازل من جمع عدد ضخم من النتائج خلال السنوات الماضية استخدموها فى تحديد متوسط زمن انتقال موجات بى و إس لأى مسافة . كما عملت منحنيات زمن الانتقال –time

distance curves والتى توضح أنه كلما زادت المسافة بين السيزموجراف والمركز السطحى للزلزال epicenter ، زاد الفرق بين زمن وصول موجات بى وموجات إس (شكل 7.16) .

كما يوضح شكل (8.16) أنه يمكن تحديد المركز السطحى لأى زلزال باستخدام منحنيات زمن الانتقال، ومعرفة زمن وصول كل من موجات P و S عند أى ثلاثة مواقع للسيزموجراف أو أكثر . ويعطى ناتج طرح زمن وصول أول موجة أولية من زمن وصول أول موجة ثانوية فرق الزمن المنقضى بين وصول الموجتين عند كل موقع سيزموجراف . وبإسقاط فرق الزمن من المواقع المختلفة على منحنيات زمن الانتقال ورسم خط مستقيم لأسفل إلى المحور



شكل (**8.16**): تحديد مكان مركز الزلزال . حيث يوضح الفرق فى زمن وصول موجات **S-P** نصف قطر قدره **164** كم من ممفيس و**236** كم من سانت لويس و**664** كم من كولمبس. وتتقاطع الدوائر الثلاثة ذات أنصاف الأقطار السابقة فى نيومدريد – ميسورى ، وهى مركز الزلزال .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill. Boston).

الذى يوضح المسافة من بؤرة الزلزال ، فإنه يتم تحديد المسافة بين السيزموجراف والمركز السطحى للزلزال . ويرسم بعد ذلك على الخريطة دائرة يساوى نصف قطرها المسافة التى تم الحصول عليها من منحنيات زمن الانتقال حول كل موقع من مواقع السيزموجراف (شكل 8.16) . وتحدد نقطة تقاطع الدوائر الثلاثة موقع المركز السطحى للزلزال . وجدير بالملاحظة أنه لابد من استخدام ثلاثة مواقع للسيزموجراف على الأقل ، لأن استخدام موضعين فقط يحدد إمكانية وجود مركزين سطحيين للزلزال ، بينما يؤدى استخدام موقع واحد للسيزمواجراف إلى إمكانية وجود عدد لانهائى من مواقع المراكز السطحية للزلزال . وتستخدم حاليا الحاسبات الآلية فى تحديد مواقع المراكز السطحية للزلازل، حيث يتم استخدام عديد من مواقع السيزموجراف بهدف الحصول على نتائج أدق .

د. قياس شدة وقدر الزلزال

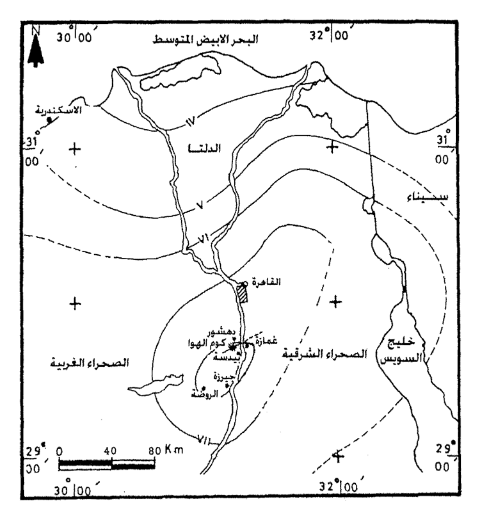
إن تحديد موقع الزلازل هو خطوة أولى فقط لفهم تلك الزلازل ، ولكن لابد أن يحدد علماء الزلازل قوة الزلزال . ويتم هذا التحديد بطريقتين: الأولى وهى شدة الزلزال intensity وهى تقييم نوعى ووصفى لأنواع الدمار الناشئ عن زلزال ما ، والطريقة الثانية هى قدر الزلزال magnitude وهى قياس كمى لمقدار الطاقة المنطلقة من زلزال ما . وتمدنا كل من الطريقتين بنتائج هامة عن الزلازل وتأثيرها ، حيث يمكن استخدام هذه المعلومات عن الزلزال فى دراسة ومحاولة توقع زلازل مستقبلية .

1. شدة الزلزال

شدة الزلزال**intensity** هى قياس نوعى ووصفى للدمار الناتج عن زلزال ما ورد فعل الناس لها . وقد استخدم الجيولوجيون الشدة منذ منتصف القرن التاسع عشر كتقدير تقريبى لحجم وقوة زلزال ما .

وأكثر مقاييس الشدة استخداما فى الولايات المتحدة والعالم مقياس شدة ميركالى المعدل **Modified Mercalli Intensity Scale** . وهو مقياس مقسم إلى اثنى عشر قسماً ، تكتب بالأرقام الرومانية ، ويبدأ برقم I والذى يعبر عن الزلازل التى لا يشعر الناس بها، وينتهى برقم XII والذى يعبر عن حدوث دمار شامل تقريبا . وهو مقياس معدل لمقياس العالم الإيطالى ميركالى G.Mercalli ، والذى وضعه سنة 1902م وتم تعديله عام 1931م فى الولايات المتحدة الأمريكية (جدول 1.16) .

وعموماً ، وعلى الرغم من حقيقة أن الزلزال الكبير يسبب دماراً أكبر من الزلزال الصغير، إلا أن هناك عددًا من العيوب فى استخدام ذلك المقياس . حيث يعتمد الدمار على البعد عن المركز السطحى للزلزال (شكل 9.16) وعمق بؤرة الزلزال والكثافة السكانية وجيولوجية المنطقة المتأثرة بالزلزال ونوعية المواد المستخدمة فى البناء وطريقة البناء ومدة الاهتزاز . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن تقدير حجم الدمار يكون موضوعيا ، بمعنى أن بعض الناس قد يضخم حجم الدمار سواء عن قصد أو عن غير قصد ، إلا أن الميزة



شكل (**9.16**): خريطة توضح شدة الزلزال الذى تعرضت له مدينة القاهرة الكبرى عصر يوم **12** أكتوبر عام **1992**م . ويلاحظ أن شدة الدمار تقل كلما ابتعدنا عن المركز السطحى للزلزال عند قرية كوم الهوا بالفيوم .

(After Sabri, A. M. *et al.*, 1993: Koam Al-Hawa earthquake, 12 October, 1992, Egypt: A damage in the Nile Valley. Ain Shams Sci. Bull., (Special Issue), 8-22).

الكبرى لاستخدام مقياس شدة الزلزال هو أنه لا توجد حاجة لاستخدام أجهزة خاصة .

2. قدر الزلزال

عند مقارنة الزلازل كميا ببعضها ، فإننا يجب أن نستخدم مقياساً مستقلا عن مقياس شدة الزلزال يقيس كمية الطاقة المنطلقة عن الزلزال . وقد قدم تشارلز ريختر Charles F. Richter عام 1935 م من معهد كاليفورنيا للتقنية هذا المقياس ، وهو **قدر الزلزال magnitude** ، أى الكمية الكلية للطاقة المنطلقة من زلزال ما عند نقطة مصدره. ويعرف هذا المقياس **بمقياس ريختر لقدر الزلازل Richter magnitude scale** . ويبدأ هذا المقياس من قدر 1 ، بينما يكون مفتوح النهاية .

ويتحدد قدر الزلزال بقياس اتساع أكبر موجه زلزالية تم تسجيلها على السيزموجرام. ونظراً لأن الزلازل تختلف كثيراً فى قوتها ، فإن اتساع الموجات المتولدة يتفاوت آلاف المرات تبعاً لهذا الاختلاف . ولاستيعاب هذا التفاوت الكبير ، استخدم ريختر مقياساً لوغاريتميا (للأساس 10) للتعبير عن قَدْر الزلزال . فإذا تضاعف اتساع موجة الزلزال عشر مرات ، فإن ذلك يقابله زيادة قدرها وحدة واحدة على مقياس ريختر . فمثلاً ، اتساع أكبر موجة زلزالية لزلزال قدره 6، تكون عشرة أضعاف اتساع الموجه الناتجة عن زلزال قدره 5، وتزيد مائة مرة عن زلزال قدره 4 ، وألف مرة عن زلزال قدره10 = 3 (x10x10 1000).

جدول (1.16): شدة الزلازل وتكرارها على مستوى الكرة الأرضية والدمار الناشيء عنها

مقياس ريختر لقدر الزلزال	التكرار فى السنة	مقياس الشدة (ميركالى المعدل)	الأثر فى المناطق المأهولة
3.4 >	800000	I	تسجله المراصد فقط
4.2-3.5	30000	II و III	يشعر به بعض الناس داخل البيوت
4.8-4.3	4800	IV	يشعر به كثير من الناس وتهتز الشبابيك
5.4-4.9	1400	V	يشعر به كل الناس، وتتكسر الأطباق، وتهتز الأبواب
6.1-5.5	500	VI و VII	تهدم محدود فى المبانى ، تتشقق الدهانات ويسقط الطوب
6.9-6.2	100	VIII و IX	تهدم كثير من المبانى وسقوط مآذن المساجد وأبراج الكنائس وتتحرك المنازل عن أساساتها
7.3-7.0	15	X	دمار شديد والتواء الكبارى وتشقق الحوائط وينهار كثير من المبانى المبنية بالحجر والطوب .
7.9-7.4	4	XI	دمار عظيم وانهيار معظم المبانى
8.0 <	واحد كل 5 إلى عشر سنوات	XII	دمار شامل ، وتصل الموجات إلى سطح الأرض ، وتطير الأشياء فى الهواء .

* تحددت أرقام ميركالى بناءً على قدر الدمار فى المنشآت ودرجة الإحساس بتحرك الأرض، وهذه تعتمد على قدرة magnitude الزلزال وبعد الشخص عن مركز الزلزال وما إذا كان الشخص داخل المنشأ أو خارجه.

وبينما تمثل زيادة قدر الزلزال وحدة واحدة على مقياس ريختر زيادة قدرها عشر مرات فى اتساع درجة الزلزال ، فإن زيادة وحدة واحدة فى القدر تقابل تقريباً زيادة قدرها ثلاثين ضعفاً من الطاقة المنطلقة . فزلزال ألاسكا عام 1964 م والذى بلغ قدره 8.6 أطلق حوالى تسعمائة ضعف الطاقة المنطلقة من زلزال نورث ريدج Northridge earthquake عام 1994 م والذى بلغ قدره حوالى 6.7.

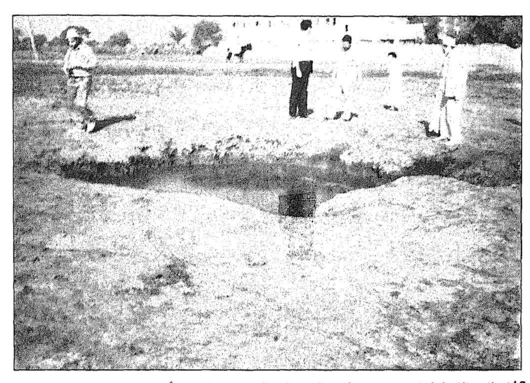
ومن المعلوم أن هناك أكثر من 900,000 زلزال تسجل حول العالم كل عام . ويمكن النظر إلى تلك الأعداد بطريقة أفضل ، كما هو موضح فى جدول (1.16) ، والذى يبين أن الغالبية العظمى من هذه الزلازل يبلغ قدرها أقل من 3.4 ، وأن الزلازل العظمى، والتى يزيد قدرها عن 8 تقع كل خمسة إلى عشرة أعوام فقط فى المتوسط. ويوضح الجدول مقارنة بين مقياسى ميركالى وريختر .

هـ. الدمار الناشئ عن الزلازل

يشمل الدمار الناشئ عن الزلازل جوانب عدة منها حدوث الهزات الأرضية والموجات الزلزالية البحرية والانزلاقات الأرضية ، بالإضافة إلى اندلاع النيران واضطراب الخدمات المعيشية والذعر والصدمات النفسية . ويعتمد مقدار الدمار فى الممتلكات وأعداد القتلى والجرحى على وقت حدوث الزلزال وقدره والمسافة من المركز السطحى للزلزال وجيولوجية المنطقة ونوع المبانى المقامة وهيكلها البنائى والكثافة السكانية ومدة الهزة الأرضية . وعادة ما تكون الزلازل التى تحدث فى وقت العمل وأثناء اليوم الدراسى فى المناطق المزدحمة بالسكان أكثر دماراً .

الهزة الأرضية: تعتبر الأعداد الكبيرة للقتلى والجرحى بسبب الهزات الأرضية من أكثر المخاطر الناشئة عن الزلازل . وتتعرض المبانى المقامة على صخور صلبة لدمار أقل من المبانى المقامة على مواد ضعيفة غير متماسكة مثل الرواسب المشبعة بالماء أو مواد الردم الصناعية ، حيث تكون مدة الهزة الأرضية المؤثرة على المواد الضعيفة والمشبعة بالماء أطول واتساع الموجة S أكبر من تلك المؤثرة على المبانى المقامة على صخور الأساس . وتميل مواد الرديم والرواسب المشبعة بالماء لأن تسيل ، أى تسلك سلوك السائل ، وهى العملية التى تعرف بالإسالة liquefaction . فعند حدوث هزة أرضية تفقد الحبيبات تماسكها وتنساب الأرض . ومن أمثلة الدمار الناتج عن الإسالة ما حدث فى نيجاتا Niigata باليابان ، حيث مالت المبانى الكبيرة على جوانبها بعد انهيار التربة المشبعة بالماء المقامة عليها المبانى على جوانب التلال . وقد سجلت ظاهرة الإسالة بمصر فى عديد من القرى على الجانب الشرقى للنيل (شكل 10.16) نتيجة الزلزال الذى تعرضت له مدينة القاهرة الكبرى بمصر يوم 12 أكتوبر 1992م . وبالإضافة إلى قدر الزلزال وجيولوجية المنطقة المقام عليها المبانى ، فإن المواد المستخدمة فى إقامة المنشآت ونوعية البناء تؤثر أيضاً على حجم الدمار الحادث . فالمنشآت المقامة من الطين ، تكون أضعف وتنهار كلها تقريباً عند تعرضها للزلزال.

اندلاع النيران: يكون اندلاع النيران أحد المخاطر الرئيسية الناجمة عن الزلازل خاصة فى مناطق الحضر . وقد تسببت النيران فى حوالى 90 ٪ من الدمار الذى حدث عام 1906م أثناء زلزال سان فرانسيسكو . حيث تسببت الهزة الأرضية فى تحطيم خطوط الغاز والكهرباء والتى لامست النيران ، وبذلك بدأت الحرائق فى أنحاء المدينة ، واستمرت لحوالى ثلاثة أيام



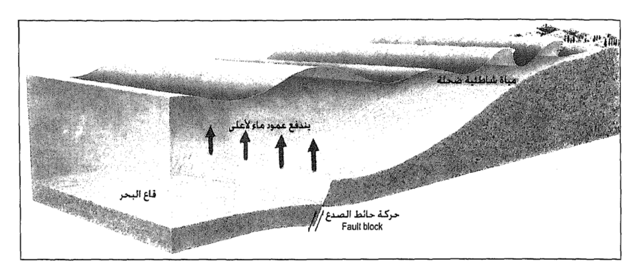
شكل (10.16): ظاهرة الإسالة فى قرية بدسة على الجانب الشرقى لنهر النيل نتيجة زلزال 12 أكتوبر 1992م .
(After Sabri, A. M. et al., 1993: Koam Al-Hawa earthquake, 12 October, 1992, Egypt: A damage in the Nile Valley. Ain Shams Sci. Bull.. (Special Issue). 8-22).

دمرت خلالها معظم المدينة . وفى عام 1989م ، وخلال زلزال لوما بريتا Loma Prieta earthquake فى سان فرانسيسكو ، حدث اندلاع محدود للنيران حيث ساعدت الصمامات الموضوعة على خطوط الغاز والماء فى عزل الخطوط المحطمة .

التسونامى (الموجات البحرية الزلزالية): تنشأ الموجات البحرية الزلزلية **seismic sea waves** أو تسونامى **tsunami** (مشتقة من الكلمة اليابانية tsu بمعنى مرفأ وnami بمعنى موجة) من الزلازل التى تحدث على قيعان المحيطات ، قد تنشأ أيضاً وبدرجة أقل من الانزلاقات الأرضية الكبيرة أو النشاطات البركانية تحت سطح البحر . ومن الشائع تسمية التسونامى باسم موجات المد والجزر tidal waves على الرغم من عدم وجود أى علاقة لهذه الموجات بالمد والجزر . وتنشأ معظم التسونامى نتيجة حركة مفاجئة لقاع المحيط ، مما يتسبب فى حدوث موجات فى الماء تنتقل للخارج (شكل 11.16) مثل الموجات التى تتكون عندما يلقى بحجر فى بركة ماء .

وتنتقل التسونامى بسرعات تتراوح بين 644 كم و725 كم/ ساعة ، وتقل تدريجيا بمرور الوقت وزيادة مسافة السفر ، ولكن تكون عموماً غير محسوسة فى المحيطات المفتوحة، حيث يكون ارتفاع موجات التسونامى عادة أقل من متر ، والمسافة الأفقية بين قمم الموجات تكون عدة كيلومترات . وعندما تقترب التسونامى من الشواطئ تقل سرعة الموجات ويرتفع الماء إلى ارتفاعات تصل إلى 30 متراً أو أكثر .

وقد ضرب التسونامى جزيرة هاواى عام 1964م ، وبعد 4.5 ساعة من حدوث زلزال بحرى قوى بالقرب من جزيرة يونيماك Unimak فى ألاسكا تحركت الأمواج بسرعة وصلت إلى 800 كم/ ساعة ، وعلى الرغم من أن اتساع الموجة فى المحيط المفتوح كان



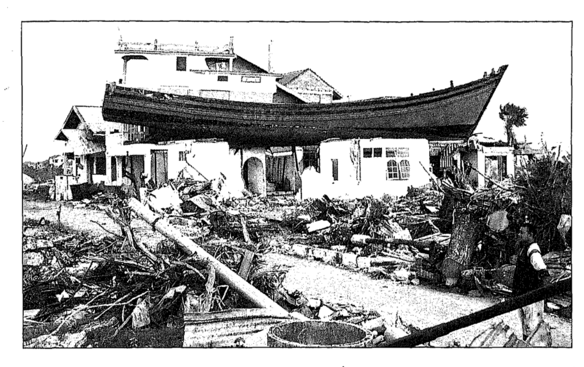
شكل (**11.16**): تنشأ التسونامى من حركة الصدوع التى تسبب الزلازل على قاع البحر . حيث ينشأ عن حركة قاع البحر بسبب الزلزال موجة بحرية عاتية تؤدى إلى تذبذب وانسياب موجة بحرية طويلة يطلق عليها تسونامى . مثل هذه الموجة يكون ارتفاعها عدة أمتار فقط على قاع البحر العميق ولكن قد يزيد ارتفاعها عدة مرات عندما تصل إلى المياه الشاطئية الضحلة .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

أقل من متر واحد ، إلا أن هذا الاتساع زاد بالقرب من الشاطئ . وعندما ضربت الموجة شواطئ هاواى كان قد وصل ارتفاعها إلى 18 مترا . وقد تسبب هذا التسونامى فى قتل 154 شخصاً ودمر من الممتلكات ما يقدر بحوالى 25 مليون دولار . وقد أدى ذلك إلى إنشاء نظام للإنذار المبكر عن التسونامى فى هونولولو بهاواى فى محاولة لتقليل الدمار الناتج عن التسونامى . ويشمل هذا النظام المبكر أجهزة سيزموجراف بالإضافة إلى أجهزة أخرى لكشف الموجات الناتجة عن الزلازل ، حتى يمكن الإبلاغ عن نشأة تسونامى وإعطاء التحذيرات فى الوقت المناسب .

وقد حدثت أكبر الموجات البحرية الزلزالية (التسونامى) دمارا فى القرن العشرين ، فى يوليو عام 1998 م فى بابوا بغينيا الاستوائية ، حيث حدث زلزال بقوة 7.1 على مقياس ريختر على بعد حوالى 20 كم من الشاطئ . ثم نشأت ثلاث موجات من المد بعد عشرين دقيقة من الزلزال ، ووصلت أعلى موجة إلى ارتفاع 15 مترا ودمرت ثلاث قرى ساحلية تماما ، وقتلت أكثر من 2200 شخص . وقد حدث هذا العدد من القتلى بسبب عدم تحذير الأهالى ، بالإضافة إلى طبيعة الأرض المنخفضة فى تلك القرى .

أما التسونامى الذى كان أقواها جميعا فهو ذلك التسونامى الذى حدث فى 26 ديسمبر عام 2004م بالقرب من جزيرة سومطرة الأندونيسية ، والذى نشأ عن زلزال فى قاع المحيط الهادى شمال أندونيسيا بقوة تزيد على 9.2 على مقياس ريختر ، وامتد تأثيره على سواحل المحيط الهندى من أندونيسيا وتايلاند شرقا حتى الصومال غربا ، ومرورا بكل شواطىء جنوب آسيا مثل الهند وسيلان (شكل 12.16). وقد تسبب هذا التسونامى فى موت مايزيد على 300.0000 نسمة، كما ألحق دمارا شاملا فى جزيرة آتشيه الأندونيسية وكثير من المناطق المطلة على المحيط الهندى.



شكل (12.16): الدمار الناشيء عن التسونامى (صورة من أحد المواقع على شبكة المعلومات الدولية – الإنترنت).

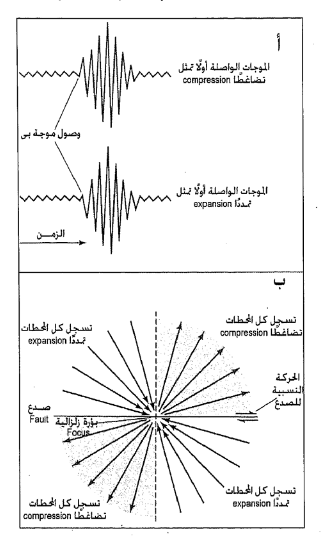
الانهيارات الأرضية : إن الانهيارات الأرضية التى تحدث نتيجة الزلازل تكون خطيرة ، خاصة فى المناطق الجبلية ، كما تكون مسئولة أيضا عن الدمار الهائل والعدد الكبير من الوفيات . وقد أدى زلزال عام 1920م فى جانسو Gansu بالصين إلى قتل ما يقرب من 100,000 نسمة بسبب انهيار الجروف المكونة من اللويس (غرين ترسب بالرياح) . كما تسبب زلزال بيرو عام 1970م فى حدوث انهيارات أرضية دمرت مدينة ينجى Yungay town.

و. تحديد نوع التصدع من نتائج الزلزال

يقوم علماء الزلازل عند حدوث زلزال ما بتحليل السيزموجرام (شريط تسجيل الزلزال) فى عدة محطات رصد ليحددوا المركز السطحى للزلزال وقدره ، ثم يقوموا بفحص التصدع الذى حدث عند هذا المركز . والهدف من هذا الفحص معرفة علاقة سطح الصدع واتجاه الانزلاق بالإجهاد أو الضغوط فى القشرة الأرضية ، وهل كان الزلزال نتيجة صدع عادى أم دسر أم انزلاق مضربى.

وإذا لم يُسجل أى أثر للتصدع فى موقع الزلزال ، فإن ذلك يرجع إلى أن بؤرة الزلزال كانت بعيدة عن سطح الأرض . ومع ذلك ، فإنه يمكن لعلماء الزلازل تحديد نوعية التصدع الذى حدث تحت السطح من المعلومات المسجلة فى السيزموجرام ، حيث إن عددا قليلا جداً من سطوح الصدوع تصل حتى سطح الأرض.

وقد تم حديثا إنشاء عديد من أجهزة السيزموجراف حول العالم ، بحيث تسجل محطات الرصد أى بؤرة زلزال محتملة . فقد لاحظ علماء الزلازل أنه إذا كانت الحركة الزلزالية الأولى للأرض والمسجلة بسيزموجراف فى اتجاه معين (موجه P) هى حركة دفع (push away) بعيداً عن بؤرة الزلزال وتتجه إلى السيزموجراف ، فهذا يعنى وصول قوة



شكل (13.16): استخدام الحركة الأولى للموجات الزلزالية فى تحديد اتجاه حركة الصدع

أ) الحركة الأولى التى يسجلها السيزموجراف للموجة P ، والتى إما أن تكون مندفعة بعيدا عن بؤرة الزلزال (وصول تضاغط) أو متجهة إلى البؤرة (وصول تباعد) .

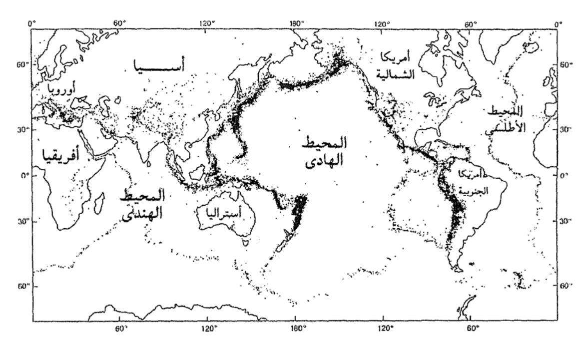
ب) تمثيل الحركات الأولى المسجلة على عدد من محطات الرصد يساعد على تحديد اتجاه الحركة على سطح الصدع . ويوضح المثال المذكور لحركة جانبية-يمينية على سطح صدع مضربى الانزلاق strike – slip fault.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ضغط، وأن الصخور قد تحركت ناحية السيزموجراف، ويكون اتجاه حركة الموجة لأعلى على السيزموجرام ، شكل (13.16 أ) . أما بالنسبة لأجهزة السيزموجراف الموجودة فى الاتجاهات الأخرى فإن الحركة تكون حركة جذب pull toward فى اتجاه بؤرة الزلزال ، مما يعنى وصول قوة شد ، ويكون اتجاه حركة الموجة لأسفل على السيزموجرام . ويوضح شكل (13.16 ب) تأثير زلزال نشأ نتيجة الحركة على صدع مضربى الانزلاق ، حيث يمكن تحديد حركة الصدع عند توقيع الحركات الأولى للزلازل من عدة سيزموجرافات .

II. توزيع الزلازل حول العالم

على الرغم من أنه لا يوجد أى جزء على سطح الأرض بعيدا عن حدوث زلازل ، إلا أن معظم الزلازل (تقريبا 95 ٪) تقع فى أحزمة زلزالية تقابل حدود الألواح ، حيث تنشأ الإجهادات (الضغوط) نتيجة تقارب الألواح أو تباعدها أو انزلاقها بموازاة بعضها البعض . وتعرف الأحزمة الزلزالية **seismic belts** بأنها نطاقات زلزالية ضيقة ومستطيلة عادة ، وتتميز بتكرار تعرضها للهزات الأرضية الزلزالية . أما النشاط الزلزالى البعيد عن حدود الألواح فإنه يكون قليلا جدا، ولكن قد يكون مدمرا عند حدوثه . والعلاقة واضحة بين حدود الألواح وتوزيع الزلازل ، حيث يلاحظ أن مواقع الزلزال تنطبق على حدود الألواح التكتونية (شكل 14.16).



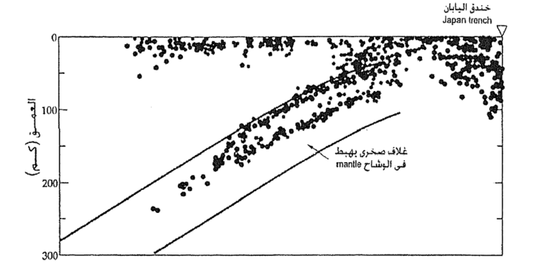
شكل (**14.16**): التوزيع الجغرافى للمراكز السطحية لثلاثين ألف زلـزال حـدثت خـلال الفـترة **1961 – 1967**م موضحة المناطق النشطة تكتونيا على سطح الأرض .

(After Barazangi, M. and Dorman, J.,1969: World seismicity maps compiled from ESSA coast and geodetic survey epicenter data, 1961-1967, Seismological Soc. Am. Bull. v. 59).

وتقع معظم الزلازل (80 ٪ تقريبا) فى الحزام الممتد على طول قاع المحيط الهادئ. ويعرف بالحزام حول الهادئ circum-Pacific belt وهو نطاق من النشاط الزلزالى يحيط بحوض المحيط الهادئ . ويمتد هذا الحزام بطول السلاسل الجبلية فى غرب أمريكا من كيب هورن إلى ألاسكا ، ثم يعبر آسيا ليمتد جنوبا على امتداد شواطئ اليابان والفلبين وغينيا الجديدة وفيجى ، ثم يكمل الدائرة حيث يتجه جنوبا إلى نيوزيلندة . وقد حدث فى هذا النطاق أكثر الزلزال تدميرا فى تاريخ الأرض ، والتى أدت لحدوث خسائر تقدر ببلايين الدولارات ، وقتل أكثر من نصف مليون من البشر.

والحزام الزلزالى الكبير الثانى هو حزام البحر المتوسط – الهيمالايا Mediterranean- Himalayan belt ، حيث يقع حوله حوالى 15 ٪ من الزلزال . ويمتد هذا الحزام غربا من إندونيسيا إلى الهيمالايا ثم إيران فتركيا ثم منطقة البحر الأبيض المتوسط حتى جبل طارق . ويعتبر زلزال عام 1993م فى الهند والذى قتل حوالى ثلاثين ألف نسمة ، وزلزال عام 1995م المدمر فى إيران والذى قتل حوالى أربعين ألف نسمة ، وزلزال عام 2003م فى مدينة بام فى جنوب شرق إيران والذى تسبب فى قتل حوالى واحدا وأربعين ألف نسمة، أمثلة للزلازل المدمرة فى هذا النطاق . وتقع الخمسة فى المائة الباقية من الزلازل فى داخل الألواح وعلى امتداد حيود وسط المحيط . ومعظم هذه الزلازل لا تكون قوية ، على الرغم من أن بعض الزلازل الكبيرة داخل الألواح تكون جديرة بالاهتمام .

والأحزمة الزلزالية هى أماكن لانطلاق كمية كبيرة من الطاقة الداخلية للأرض . ولذلك فإنه من المتوقع أن توجد مظاهر أخرى لانطلاق تلك الطاقة الداخلية تظهر فى تلك الأحزمة . ومن هذه المظاهر حيود وسط المحيط mid-ocean ridges والخنادق المحيطية العميقة والبراكين الأنديزيتية ، وغيرها من المظاهر



شكل (**15.16**): توزيع بؤر الزلازل فى قطاع رأسى مأخوذ فى نطاق اندساس مزدوج تحت جزيرة هونشو فى اليابان . تُحدد البؤر الزلزالية تحت عمق **100** كيلو متر مستويين متوازيين ، يقع أولهما على قمة اللوح المندس ، بينما يقع الآخر فى الوسط . ويكون المستوى العلوى فى حالة من التمدد، بينما يكون المستوى السفلى فى حالة من التضاغط . وتحدد الزلازل التى نشأت نتيجة هبوط جزء من الغلاف الصخرى البارد نسبيا نطاق بينى أوف **Benioff zone** .

(After Hasegawa, In Lowrie, W., 1997: Fundamentals of Geophysics, Cambridge Univ. Press, Cambridge).

الأخرى . وتحدد الأحزمة الزلزالية حدود الألواح أو تمتد موازية لها تقريبا ، قارن شكل (14.16) بشكل (11.1) .

كما يعكس عمق البؤر الزلزالية حول حدود الألواح معلومات إضافية أخرى . وتقع معظم البؤر الزلزالية على أعماق أقل من 100 كم ، حيث تشق الزلازل طريقها فى الصخور القصفة وحول حدود الألواح ، وحيث يبلغ سمك الغلاف الصخرى القصف 100 كم فقط . ومع ذلك فإنه قد ينشأ القليل من الزلازل عند أعماق كبيرة تصل إلى حوالى 700 كم . وجدير بالملاحظة أن تلك الزلازل العميقة لاتصاحب الحدود المحيطية أو الصدوع الناقلة ولكنها مرتبطة بالخنادق المحيطية . وتحدد تلك الخنادق الأماكن التى يغوص فيها الغلاف الصخرى البارد القصف فى الوشاح .

وقد أوضحت الدراسات التفصيلية للبؤر الزلزالية تحت الخنادق المحيطية ، أن هذه البؤر تتبع مسارا محددا يسمى بنطاق بينى أوف **Benioff zone** على اسم العالم الذى تعرّف على هذه الظاهرة لأول مرة (شكل 15.16). وتوضح هذه الملاحظة الهامة أن الزلازل العميقة ربما تنشأ فى اللوح البارد نسبيا والمتحرك لأسفل عند نطاقات الاندساس subduction zone. ونظراً لأن بعض البؤر الزلزالية قد توجد عند أعماق تصل إلى 700 كم ، فلابد من استنتاج أن الغلاف الصخرى الهابط بسرعة ، يمكن أن يحتفظ على الأقل بقابلية التقصف عند هذا العمق . ومع ذلك ، فإنه من غير المعروف لماذا لم يتم تسجيل أى زلزال عند أعماق أكبر من 700 كم . بينما يرجع البعض ذلك إلى أن الغلاف الصخرى الهابط بسرعة وعند وصوله لعمق 700 كم يصبح ساخنا بدرجة تكفى لأن تجعل الصخور لدنة أكثر منها قصفة . وتوضح مواقع الزلازل أشكال وتراكيب الألواح التكتونية . ولكى نتعرف طريقة تحرك الألواح واستجابتها للقوى المؤثرة عليها ، فإن ذلك يستلزم إجراء مزيد من الدراسات

الزلزالية التفصيلية ، خاصة دراسة الحركة الزلزالية الأولى .

III. الزلازل وتكتونية الألواح

تقدم نتائج تحديد مواقع الزلازل والحركات الأولى للزلزال أهم الأدلة على صحة نظرية تكتونية الألواح . ويوضح (شكل 14.16) حدود الألواح التى تحددها أحزمة زلزالية ضيقة ، كما أمكن تحديد حركاتها بواسطة دراسات الحركة الأولى للزلازل .

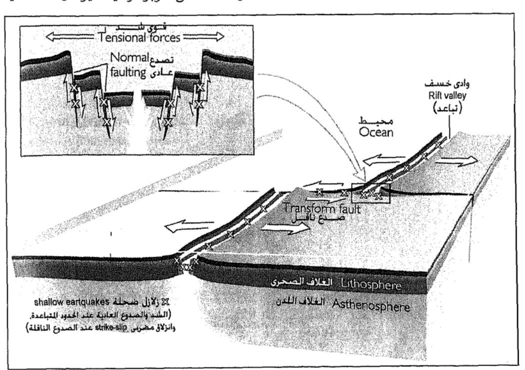
وكما أوضحنا فى الفصل الأول فإنه يمكن تمييز ثلاثة أنواع من حدود الألواح :(1) حدود متباعدةdivergent boundaries أو مراكز انتشار spreading centers والتى تتطابق مع وديان الخسف فوق القارات وحيود وسط المحيط ، (2) حدود الصدع الناقل transform fault boundaries، (3)) حدود متقاربة convergent boundaries والتى تتطابق مع الخنادق المحيطية أو نطاقات التصادم القارى . وينشأ عند كل حد من هذه الحدود زلازل مميزة طبقاً لحركات الصدع وأعماق البؤر الزلزالية . ويوضح الشكلان(16.16 و 17.16) أنواع الحدود والزلازل المصاحبة لتلك الحدود .

أ. الأحزمة الزلزالية عند حدود الألواح

يوضح شكل (14.16) مواقع المراكز السطحية للزلازل والتى تقع فى أحزمة . كما أمكن فى السنوات الأخيرة تحديد الأحزمة الزلزالية بدقة بحيث يمكن مضاهاتها بالمظاهر الجيولوجية المختلفة .

1. الزلازل الضحلة البؤرة عند الحدود المتباعدة

تقع كل حدود الألواح المتباعدة تقريبا على قيعان المحيطات . وتتطابق الأحزمة الضيقة لزلازل وسط المحيط مع قمم حيود وسط المحيط (شكل 16.16) . وعند فحص طوبوغرافية حيود وسط المحيط تفصيليا ،



شكل (16.16): الزلازل المصاحبة لنوعين من حدود الألواح: الحدود المتباعدة عند حيود وسط المحيط mid-ocean ridges ، وحدود الصدوع الناقلة transform faults .

After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

وُجد أن الحيود تكون غالبا مقسمة إلى أجزاء ، حيث تفصل الصدوع الناقلة بين تلك الأجزاء . وتقع المراكز السطحية للزلازل أيضاً على امتداد الصدوع الناقلة بين أجزاء الحيود المزاحة . كما أوضحت دراسة ميكانيكية الصدوع عند قمة الحيود المحيطية من تحليل الحركة الزلزالية الأولى لموجة P ، أن تلك الصدوع من النوع العادى وأن مضربها يمتد موازيا لاتجاه الحيود المحيطة. وتدل الصدوع العادية normal faults أن قوى الشد كانت هى القوى السائدة ، ويفسر ذلك وجود وديان خسف تمتد عند قمم الحيود . وقد وجد علماء الزلازل أن حيود وسط المحيط تحدد حدود الألواح ، حيث تتباعد الألواح عن بعضها البعض . كما وجدوا أيضا أن الزلازل التى تتطابق مع الصدوع الناقلة توضح ميكانيكية الانزلاق المضربى . ويقدم علم الزلازل الدليل على أن الألواح كانت تتباعد عن بعضها عند قمم حيود وسط المحيط .

2. الزلازل الضحلة البؤرة عند حدود الصدوع الناقلة

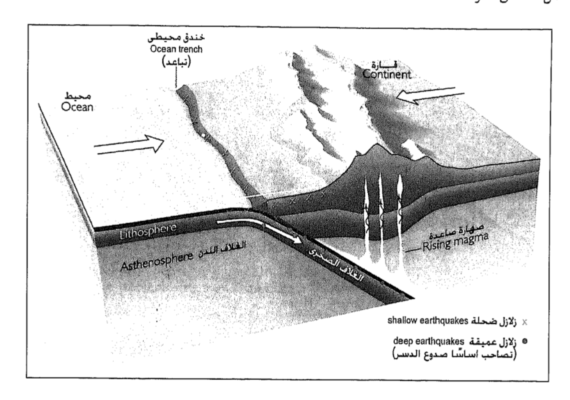
كما أوضحنا فى الفصل الأول ، فإن الصدوع الناقلة هى صدوع رأسية مضربية الانزلاق strike-slip faults تقطع الغلاف الصخرى . وهى الحدود التى ينزلق عندها لوحان بمحاذاة بعضهما البعض.

وتدل دراسة الحركة الأولى للزلازل أن الحركة التى تحدث على امتداد حدود الصدوع الناقلة هى حركة موازية لاتجاه المضرب ، وأن الزلازل ضحلة البؤرة لا يزيد عمقها على 100 كم ، وتتميز بقيم عالية على مقياس ريختر . وتدل دراسة مواضع البؤر الزلزالية أنه عندما يقطع صدع ناقل قشرة قارية فإنه يتكون فى الغالب من سلسلة من الصدوع المتوازية ، بدلا من صدع واحد . ويبدو أن هذا هو الحال عند دراسة صدع سان أندرياس بأمريكا .

3. الزلازل العميقة البؤرة عند الحدود المتقاربة

لقد أظهرت الدراسات أن الزلازل التى تنشأ عند أعماق تزيد على 100 كم تتطابق مع نوعين من المواضع أولهما : حدود الاندساس subduction boundaries ، حيث يحدث اندساس subduction لغلاف صخرى يعلوه قشرة محيطية فى الوشاح (الأسثينوسفير أو الميزوسفير) . وتمثل الحافة الغربية لقارة أمريكا الجنوبية وسلاسل الجزر التى تكوّن اليابان والفلبين مثل تلك المناطق . ثانيهما: حدود التصادم collision boundaries حيث تتصادم قارتان . ويتميز كل نوع من تلك الحدود المتقاربة بنمط معين من النشاط الزلزالى.

فعندما يندس غلاف صخرى محيطى ، فإنه يتعرض لإجهادات (ضغوط)stresses معقدة ، وتحدث عدة أنواع من الزلازل (شكل 16. 17). ويتسبب انحناء الغلاف الصخرى لأسفل أثناء عملية الاندساس فى حدوث صدوع عادية فى الجزء العلوى من اللوح ، وتكون كل الزلازل المصاحبة لتلك الصدوع ضحلة البؤرة جدا وذات قيم قليلة على مقياس ريختر. وتتضمن عملية الاندساس انزلاق لوح تحت آخر. ولذلك فإن الحد الفاصل بين هذين اللوحين يكون عبارة عن صدع دسر thrust fault ، وتكون الزلازل المتكونة عند عمق أقل من 100 كم (المنطقة التى يتلامس فيها لوحى الغلاف الصخرى) ذات قيم كبيرة على مقياس ريختر. وعندما يزيد العمق عن 100 كم ، ويغوص الغلاف الصخرى المندس فى الأسثينوسفير، فإن الزلازل تحدث فى اللوح المندس. وتدل بعض الزلازل على حدوث إجهاد شد (صدوع عادية)، بينما تدل الزلازل الأخرى على حدوث إجهاد ضغط (صدوع معكوسة). وتدل الزلازل العميقة الناشئة عن



شكل (17.16): الزلازل الضحلة والعميقة المصاحبة لحدود الألواح المتقاربة ، حيث تنشأ الزلازل نتيجة قوى الضغط . وقد أدى اصطفاف البؤر الزلزالية فى مستوى مائل إلى اكتشاف الألواح المندسة .
(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

قوى شد فى الألواح المندسة ، على أن الغلاف الصخرى يغوص تحت تأثير وزنه.

وقد وجد أن الزلازل التى تنشأ عند حدود التصادم، وهى تمثل حدودا متقاربة أيضا، تتميز بنشاط زلزالى معين . وحدود التصادم collision boundaries هى الأماكن التى تتصادم فيها قارتان . وتمثل سلسلة جبال الهيمالايا بين الهند وآسيا، حد تصادم لم يصل لمرحلة الثبات بعد . ويميل نطاق التصادم لأن يكوّن منطقة يبلغ عرضها عدة كيلومترات تعرضت الصخور فيها لتضاغط شديد ، وتوجد فيها صدوع دسر . ويزداد سمك الغلاف الصخرى عند نطاق التصادم . وقد توجد بؤر الزلازل على أعماق تصل إلى 300 كم وتكون ذات قيم أكبر على مقياس ريختر . وتدل الحركات الأولى للزلازل على نشأة تلك الزلازل نتيجة الحركة على صدوع دسر.

4. الزلازل الضحلة البؤرة داخل الألواح

على الرغم من أن معظم الزلازل توجد عند حدود الألواح ، إلا أن الخريطة الزلزالية للعالم توضح وجود نسبة بسيطة من الزلازل داخل الألواح . وتتميز البؤر الزلزالية لتلك الزلازل بأنها ضحلة نسبيا ، وأن معظمها يوجد فوق القارات. ومن بين تلك الزلازل ، بعض الزلازل الأكثر تدميرا فى التاريخ الأمريكى ، مثل نيومدريد – ميزورى عام 1812م وشارليستون فى جنوب كارولينا عام 1886م وبوستون فى ماساسوشتس عام 1755م . ويبدو أن هناك قوى كبيرة داخل القشرة الأرضية لا تزال تعمل وتسبب التصدع داخل ألواح الغلاف الصخرى ، بعيدا عن الحدود الحديثة للألواح .

IV . توقع الزلازل

تعتبر الزلازل أهم أسباب الكوارث الطبيعية المروعة . ولذلك ، فإنه من الطبيعى أن تدور نسبة كبيرة من الأبحاث حول الزلازل ، حيث يحدو العلماء الأمل فى التوصل إلى طريقة لتحسين قدرتنا على توقع الزلازل من خلال تلك الأبحاث . ويعتمد توقع الزلازل على: (1) أساس إحصائى ، مثل الفجوة الزلزالية وزمن التكرار ، (2) أساس فيزيائى مثل التغيرات فى القشرة الأرضية وخصائصها الفيزيائية ، (3) أساس بيوفيزيائى مثل سلوك الحيوانات .

ونعرض فيما يلى وصفا لكل من هذه الطرق الثلاث.

أ. توقع الزلازل على أساس إحصائى

إذا طلب من أحد علماء الزلازل أن يتوقع موعد حدوث زلزال كبير فإن إجابته ستكون "كلما طال الزمن منذ آخر زلزال كبير كلما اقترب موعد الزلزال الكبير التالي". وتمثل هذه المقولة الأساس الذى تقوم عليه طريقة الفجوة الزلزالية **seismic gap method** . والفكرة الرئيسية لهذه الطريقة ، أن الزلازل تنتج نتيجة تراكم الإجهادات الناشئة عن الحركة المطردة للألواح على امتداد الصدوع ، وعند الوصول إلى مستوى حرج من الإجهاد ، فإن الغلاف الصخرى يتكسر . وتتكرر هذه الدورة التى تنشأ من التراكم البطىء للإجهاد والانطلاق المفاجئ للطاقة فى هيئة زلزال مرات ومرات . ويختلف متوسط الفترة الزمنية الفاصلة بين زلزالين قويين من مكان لآخر . وطبقاً لطريقة الفجوة الزلزالية ، فإن المناطق ذات الاحتمالات العالية لحدوث زلازل قوية فى نطاق صدع نشط ، هى المسافة أو الجزء المغلق من صدع لم يحدث به زلزال رئيسى لفترة زمنية تساوى أو تزيد عن متوسط الفترة الزمنية بين زلزالين قويين فى هذا الموقع ، بينما قد تحدث مثل هذه الزلازل فى بقية النطاق.

ويقدم الجزء من صدع سان أندرياس الذى يقطع جنوب كاليفورنيا مثالاً واضحاً على تطبيق هذه الطريقة. ويقدر زمن التكرارrecurrence time بين زلزالين قويين فى هذه المنطقة والمقدر بعدة طرق ، من 100 إلى 150 سنة . ونظرا لأن آخر زلزال قوى قد حدث فى تلك المنطقة فى عام 1857 م ، فإنه من المتوقع حدوث زلزال قوى جديد فيها فى أى وقت من الآن حتى عدة عقود تالية .

ب. توقع الزلازل على أساس فيزيائى

وينشغل علماء الولايات المتحدة واليابان والصين وروسيا والعديد من الدول الأخرى حاليا فى بحث مكثف عن المؤشرات التى يمكن أن تستخدم فى توقع وقت ومكان الزلازل المدمرة على أساس التغيرات الفيزيائية فى القشرة الأرضية . وقد توصلوا إلى بعض المؤشرات التى يمكن أن تستخدم فى هذا الإطار وهى:

- الميل السريع للأرض ، أو تشوه سطح الأرض بأى شكل من الأشكال.
- انزلاق لازلزالى aseismic غير عادى، يحدث ببطء على امتداد صدع بدلاً من الانزلاق المفاجئ الذى يصاحبه زلزال فى المنطقة قبل الهزة الرئيسية.
- استطالة القشرة الأرضية فى فترة معينة ، وقد يسبب هذا الانفعال الناشئ عن الشد فى جذب الكتلتين على جانبى الصدع ، مما يقلل من الاحتكاك من الكتلتين على جانبى الصدع ، ويسبب بالتالى عدم قفل الصدع unlocking .
- التغير فى مستوى سطح الماء فى الآبار . وقد تسبق تلك التغيرات الزلزال بسبب زيادة أو نقص مسامية الصخور كنتيجة للتغيرات الأولية فى الإجهاد .
- التغير فى الخواص الفيزيائية للصخور بالقرب من صدع ما ، مثل قابليته لتوصيل تيار كهربى.

- الزيادة غير العادية فى تكرار حدوث زلازل صغيرة قبل هزة رئيسية .

وفى الحقيقة ، فقد تم تتبع كل تلك الظواهر ، حيث إن ظاهرتين أو أكثر منها قد تجتمعان ، إلا أنه ليس بالطريقة التى يمكن اعتبارها طريقة ثابتة ويعول عليها فى التوقع .

جـ. توقع الزلازل على أساس بيوفيزيائى

نظراً لمعاناة الصين من عديد من الزلازل الرهيبة ، فقد حاول العلماء الصينيون التوصل إلى طريقة توقع الزلازل وذلك من خلال ملاحظة سلوك الحيوانات عند حدوث الزلازل . ففى يوم 18 يوليو 1969 م لاحظ حراس حديقة حيوانات تيانجين Tianjin أن حيوانات الباندا (حيوانات تشبه الدب) الهادئة أخذت فى الصراخ ، كما رفض البجع الاقتراب من الماء ، ولم تختبئ الثعابين فى جحورها تحت الأرض . كما تضمن تقرير حراس الحيوانات أيضا المزيد من الملاحظات التى يمكن أن تستخدم فى توقع الزلازل . وقد حدث زلزال قدره 7.4 على مقياس ريختر فى اليوم نفسه .

برامج الحماية الزلزالية: تعطى خريطة المخاطر الزلزاليةseismic-risk map الأساس لتنظم البرامج المحلية للحماية من الزلازل طبقاً لدرجة الخطر . ففى مناطق المخاطر العالية ، فإن مدونة (كود) المبانى تتطلب تصميمات هندسية تتحمل الآثار التدميرية للزلازل . ويجب عند البناء فى مناطق خطيرة مراعاة تثبيت الأساس جيداً ، وتثبيت خطوط الغاز بالأرض جيداً، كما يجب أن تكون الخطوط مرنة لتجنب حدوث أى تسرب للغاز، والذى يكون مصدراً للحرائق فى هذه الحالة . كما يجب تثبيت الأرفف بالحوائط ، ووضع الأشياء الثقيلة فى الأجزاء السفلى منها ، وكذلك تجنب وضع أسرة النوم بالقرب من النوافذ .

٧. استكشاف باطن الأرض باستخدام الموجات الزلزالية

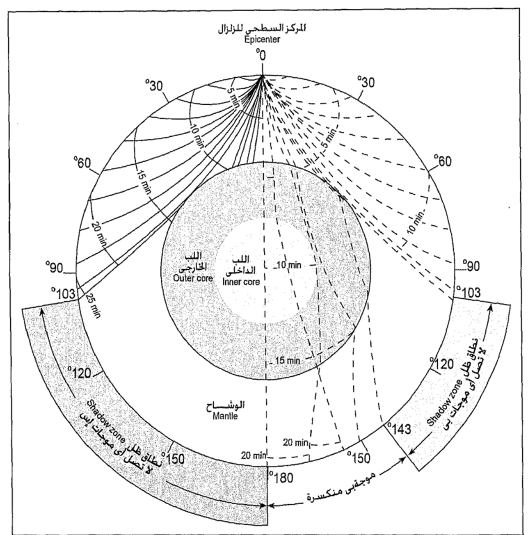
يعرف الجيولوجيون أن الأنواع المختلفة من الموجات الزلزالية تتميز بصفات عامة مشتركة هى:

1. تعتمد السرعة التى تنتقل بها الموجات على كثافة ومرونة elasticity المادة التى تمر خلالها. فتنتقل الموجات الزلزالية بسرعة أكبر فى المواد الصلبة التى تعود فيه المادة إلى شكلها الأصلى بمرونة عند زوال الإجهاد المؤثر . فقد تنتقل الموجات الزلزالية بسرعة أكبر خلال الصخور المتبلورة مثل الجرانيت عنها خلال طبقة من مادة غير متماسكة مثل الرمل .
2. تزيد سرعة الموجات الزلزالية عموما فى الطبقة نفسها كلما زاد العمق ، حيث تسبب زيادة الضغط كبس الصخر ليصبح أكثر تماسكاً ومرونة.
3. الموجات الأولية (موجات P) هى موجات تضاغطية تتأرجح إلى الأمام والخلف فى الاتجاه نفسه الذى تنتقل فيه ، بينما الموجات الثانوية (موجات S) هى موجات قص shear waves ، أى موجات مستعرضة تسبب اهتزاز المواد التى تمر خلالها فى اتجاه عمودى على اتجاه انتشارها . وتنتقل الموجات الأولية بسرعة أكبر من الموجات الثانوية عبر الأرض.
4. عندما تنتقل الموجات الزلزالية من مادة إلى أخرى ، فإن بعض الموجات ترتد عند الحد الفاصل بين المادتين ، بمعنى أنها تنعكس ، بينما ينفذ بعضها إلى المادة الأخرى، مثلما ينعكس الضوء جزئياً عند زجاج النافذة ، بينما يمر بعضه الآخر. وتنحنى الموجات التى تنفذ خلال الحد الفاصل بين الوسطين أى تنكسر ، حيث إن سرعة الموجات فى المادة الثانية تختلف عن سرعتها فى المادة الأولى .

أ. انتقال الموجات الزلزالية فى الأرض

إذا افترضنا جدلا أن الأرض تتكون من مادة واحدة متجانسة ذات خصائص ثابتة من سطح الأرض وحتى مركز الأرض، فإن الموجات الأولية والثانوية سوف تنتقل فى خط مستقيم من بؤرة الزلزال وعبر الأرض حتى جهاز السيزموجراف البعيد. ولكن، لا تتبع الموجات المسار المستقيم عند انتقالها عبر الأرض. مما دعا الجيولوجيين إلى أن يستنتجوا أن الأرض تتكون من طبقات، تتكون من مواد مختلفة تنتقل عبرها الموجات بسرعات مختلفة. وتنحنى الموجات عندما تنتقل من طبقة لأخرى، ولذلك يكون مسار الموجات فى باطن الأرض منحنيا.

وتقدم نتائج دراسة الموجات الزلزالية أحد أهم الأدلة على وجود لب الأرض. فالموجات الزلزالية لا تصل إلى مناطق معينة من الأرض على الجانب المقابل لزلزال كبير. ويوضح (شكل 18.16) أن



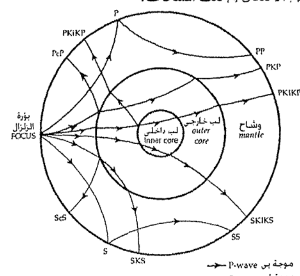
شكل (18.16): مسارات الموجات P من مركز الزلزال والتى يكون لها مركز سطحى epicenter عند 0° وهى مبينة بخطوط متقطعة فى الجزء الأيمن من القطاع فقط، أما مسارات الموجات S فتكون مبينة بخطوط متصلة فى النصف الأيسر من الشكل. ويخلق انعكاس وانكسار الموجات P على الحد الفاصل بين الوشاح واللب نطاق ظل shadow zone لموجات P من 103° إلى 143°. وحيث إن موجات S لاتستطيع المرور عبر السوائل، فإنه يوجد نطاق ظل لموجات S بين 103° و180°.

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

موجات P تنتشر من زلزال ما وتصل إلى سطح الأرض حتى 103° من بؤرة الزلزال، ثم تختفي تلك الموجات فجأة من السيزموجرام.

وعند تتبع مسار الموجة التي تكاد تلمس لب الأرض، فإنها تصل إلى سطح الأرض عند زاوية مقدارها 103°، ثم إذا تتبعنا الموجات التي تخترق لب الأرض، فإننا نلاحظ أنها تنحني لأسفل عند دخولها اللب ثم تنحني ثانية عند مغادرة لب الأرض. وبسبب هذا الانحناء عند الحد الفاصل بين لب الأرض والوشاح، فإنه لا يبزغ أي من هذه الموجات عند سطح الأرض قبل مسافة زاوية مقدارها 143° من بؤرة الزلزال. ولذلك، لا تصل أي موجات أولية (موجات P) إلى سطح الأرض بين 143° و 103° حيث يشكل لب الأرض ظلاً على امتداد ذلك النطاق، والذي يسمى نطاق الظل **shadow zone**. ويشبه ذلك، ما يحدث عندما يحجب جسم معتم أشعة الضوء، ويتكون ظل خلف هذا الجسم. وبعد أكثر من 143° من بؤرة الزلزال، تعاود موجات P الظهور مرة ثانية على السيزموجرام.

وقد أدى اكتشاف نطاق الظل أن يستنتج الجيولوجيون أن للأرض لبا مكونا من مادة مختلفة عن الوشاح الذي يعلوه. كما استنتجوا أن هذا اللب في حالة سائلة، لأن الأمواج تنحني لأسفل بدلاً من انكسارها لأعلى حينما تنفذ في اللب، مثل انكسار شعاع الضوء لأسفل عند انتقاله من الهواء إلى الماء. ويعني ذلك أن الموجات تنتقل في اللب بسرعة أقل من انتقالها في الوشاح. لأنه من المعروف أن الموجات الأولية (موجات P) تنتقل بسرعة أقل بكثير في السوائل عنها في المواد الصلبة. ولذلك فإنه من المنطقي أن نستنتج أن وجود نطاق الظل يستوجب أن الجزء الخارجي من اللب في حالة منصهرة. وقد ساهم دليل آخر مستمد من سلوك الموجات الثانوية (موجات S) في التوصل للاستنتاج السابق (شكل 18.16). فعندما تنفذ الأشعة الثانوية في اللب، فإنها تفشل في أن تصل إلى الجانب الآخر للأرض. ويتكون أيضا نطاق ظل بالنسبة لموجات S، إلا أنه أكبر من نطاق ظل موجات P، فموجات S لاتسجل خلال كل المنطقة بعد 103° من بؤرة الزلزال. ويشير وجود نطاق ظل موجات S إلى أن هذه الموجات لا تنتقل خلال اللب على الإطلاق. ومن المعروف أن الموجات الثانوية لا تنتقل خلال السوائل، ولذلك استنتج الجيولوجيون أن لب الأرض في حالة منصهرة وقد حجب الموجات الثانوية من الانتقال في تلك المسافات.



شكل (**19.16**): مسارات الموجات الزلزالية لبعض حالات موجات P وموجات S المنعكسة والمنكسرة المهمة من زلزال بؤرته على سطح الأرض.

(After Lowrie, W., 1997: Fundamentals of Geophysics, Cambridge Univ. Press, Cambridge).

وحيث إن وجود موجة منعكسة يتطلب وجود حد يفصل بين مادتين، لذلك فإن وجود انعكاسات reflections للموجات داخل الأرض يعني وجود حدود في باطن الأرض. ولنرى ماذا يحدث عندما ترتد موجات P وموجات S عند الحد الفاصل بين طبقتين. ويوضح شكل (19.16) أنه يمكن استخدام الموجة

PcP أثناء ارتدادها من لب الأرض إلى سطحها فى تحديد عمق لب الأرض ، لأن سرعة الموجات الأولية معروفة ، وبالتالى يمكن حساب الزمن الذى تستغرقه رحلة الموجة PcP ، كما يحدث بالضبط عند استخدام الزمن الذى يستغرقه الصدى echo لنسمعه مرة أخرى فى قياس المسافة من جانب الوادى إلى الجانب الآخر. كما يمكن أن ترتد الموجات الأولية من سطح الأرض إلى داخل الأرض كما توضحه الموجة PP فى شكل (19.16) . كما يوضح الشكل الموجات الثانوية المرتدة مرة أخرى داخل الأرض (موجه SS فى شكل 19.16) . والموجات الأولية التى تخترق اللب الخارجى (PKP) أو اللب الداخلى (PKIKP) هى موجات مهمة لاكتشاف تلك المناطق . ومن أهم التطبيقات العملية لانعكاس الموجات الزلزالية الاصطناعية استخدامها فى استكشاف البترول ، وكذلك قياس سمك الثالج ، أو استخدام الموجات الأولية (موجات P) من مصدر صناعى لتحديد عمق المحيط.

ب. اكتشاف التركيب الداخلى للأرض

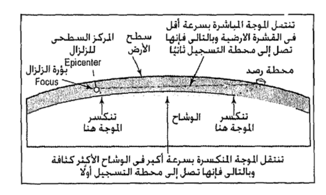
أدى ظهور أجهزة تسجيل الزلازل الحساسة والساعات العالية الدقة إلى دراسة الموجات الزلزالية بدقة. وقد أصبح من الممكن اكتشاف وجود تغير مفاجئ فى سرعة الموجات عند أعماق معينة ، بالإضافة إلى التغير التدريجى فى سرعتها وانعكاساتها كما سبق أن ذكرنا. وحيث إنه قد تم رصد تلك التغيرات الفجائية (الانقطاعات) على مستوى العالم ، فقد توصل علماء الزلازل إلى أن الأرض يجب أن تكون مكونة من طبقات مميزة أو أغلفة shells مختلفة فى مكوناتها المعدنية أو فى بنيتها البلورية . ويبدو أن وجود طبقات مختلفة المكونات (المحتوى) يرجع إلى عملية التمايز differentiation التى حدثت فى المراحل الأولى من نشأة الأرض عندما كانت الأرض منصهرة تماماً ، حيث هبطت المواد الثقيلة ذات الكثافة العالية بينما طفت المواد الأخف ذات الكثافة الأقل إلى أعلى . أما التطبق التركيبى structural layering فهو يمثل مادة لها المكونات نفسها ولكنها تعرضت إلى تغير فى أطوارها. ويحدث التغير فى الطور عندما ينصهر الصخر كلية أو يقارب ذلك ، أو عندما تعيد الذرات ترتيب نفسها فى المعادن فى بنيات بلورية أكثر إحكاما نتيجة للضغوط الهائلة التى توجد عند الأعماق الكبيرة.

وبناءً على نتائج دراسة الزلازل التى جمعت من محطات الرصد المنتشرة على مستوى العالم ، فقد تم عمل دراسة تفصيلية عن باطن الأرض . وتوضح تلك الدراسة أن الأرض تنقسم إلى أربع طبقات رئيسية هى: (1) القشرة crust وهى طبقة خارجية رقيقة جداً، (2) الوشاح mantle وهو طبقة صخرية تقع تحت القشرة ويبلغ سمكها الأقصى 2885 كم ، (3) اللب الخارجى outer core وهو طبقة يبلغ سمكها حوالى 2270 كم وله خصائص سائل متحرك ، (4) لب داخلى inner core وهو عبارة عن جسم كروى فلزى صلب يبلغ نصف قطره 1216 كم. وتتميز كل طبقة من تلك الطبقات بمجموعة من الخصائص نعرضها فيما يلى ، بالإضافة إلى بعض الملامح الخاصة لتلك الطبقات.

1. القشرة

توصل العالم اليوغوسلافى موهوروفيتش Mohorovicic إلى الدليل على وجود حد فاصل بين القشرة الأرضية والوشاح ، حيث لاحظ أن أجهزة السيزموجراف الموجودة على بعد حوالى 800 كم من بؤرة الزلزال السطحية ، والتى تقع بؤرتها على بعد حوالى 40 كم من سطح الأرض ، قد سجلت

مجموعتين متميزتين من موجات P وموجات S . واستنتج موهوروفيتش أن المجموعة الأولى من موجاتP و S قد انتقلت من البؤرة إلى محطة الرصد عبر مسار مباشر خلال القشرة الأرضية ، بينما المجموعة الثانية من موجاتP و S والتى وصلت بسرعة أكبر نسبيا ، فهى الموجات التى انكسرت عند عمق معين فى باطن الأرض ، ثم نفذت فى نطاق سرعة أعلى يقع أسفل القشرة ، ثم انتقلت خلال هذا النطاق لتنعكس مرة أخرى لأعلى إلى سطح الأرض (شكل 20.16). وقد افترض موهوروفيتش أن هناك حداً مميزا يفصل القشرة عن نطاق يوجد أسفلها يختلف فى المكونات الصخرية . ويشير العلماء الآن إلى هذا الحد باسم انقطاع موهوروفيتش **Mohorovicic discontinuity** ويعرف بأنه حد انقطاع زلزالى يحدد قاعدة القشرة الأرضية. ويسمى هذا الحد عادة بانقطاع- إم **M-discontinuity** ، ويعرف اختصارا بموهو **Moho** .



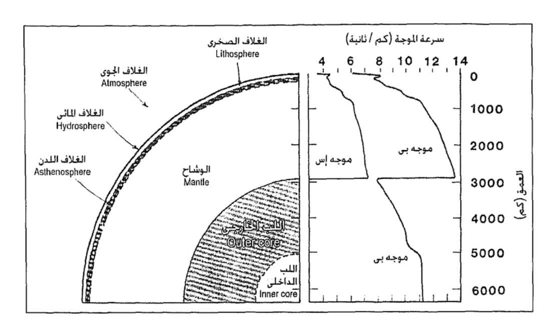
شكل (20.16): مسارات انتقال موجات زلزالية مباشرة وأخرى منكسرة من بؤرة زلزال ضحل إلى محطة رصد قريبة .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وقد استخدمت سرعات الموجات الزلزالية فى المعمل لتحديد عمق انقطاع موهو ولتقدير المكونات الصخرية المحتملة للقشرة الأرضية . ويصل سمك القشرة تحت قيعان المحيطات إلى أقل من 10 كم ، حيث تدل خصائص المرونة للقشرة المحيطية أنها مكونة من صخور البازلت والجابرو. ويختلف سمك القشرة القارية ومكوناتها الصخرية عن القشرة المحيطية ، حيث يتراوح سمك القشرة القارية من 20 إلى 60 كم ، وتميل لأن تصبح أكثر سمكا تحت كتل الجبال الأساسية. وتدل خصائص المرونة لصخور القشرة الأرضية أنها مكونة أساسا من صخور الجرانيت والديوريت ، على الرغم من أنها تتكون من صخور تشبه صخور القشرة المحيطية فى بعض المناطق الواقعة فوق انقطاع موهو مباشرة . وتتوافق تلك النتائج مع المعلومات التى تم الحصول عليها عن القشرة الأرضية من الدلائل الأخرى مثل التخريط الجيولوجى والحفر العميق فى القشرة الأرضية . وقد أعطى هذا التوافق فى النتائج الثقة للجيولوجيين لاستنتاج تركيب الوشاح والمكونات المعدنية له ، حيث يندر وجود دلائل أخرى لتقدير تركيب ومكونات هذا الوشاح .

2. الوشاح

يعتبر الوشاح لغزا كبيرا ، على الرغم من ضخامته وتحكمه فيما يحدث فى القشرة الأرضية ، حيث لا يمكن رؤيته . وتتراوح سرعة الموجات الأولية (موجات P) فى القشرة بين 6 إلى 7 كم/ ثانية ، بينما تكون تلك السرعات تحت خط موهو أكبر من 8 كم/ ثانية (شكل 21.16) . وتظهر التجارب المعملية أن سرعة الموجات الأولية فى الصخور الشائعة فى القشرة الأرضية مثل الجرانيت والجابرو والبازلت تتراوح بين



شكل (**21.16**): يساعد اختلاف سرعة موجات P و S فى تعرف التركيب الداخلى للأرض .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

6 و7كم/ ثانية ، بينما تزيد تلك السرعات عن 8 كم/ ثانية فى الصخور الغنية بالمعادن العالية الكثافة مثل الأوليفين والبيروكسين. ولذلك فإننا نستنتج أن صخورا مثل صخر البريدوتيت الغنى فى تلك المعادن يجب أن يكون ضمن المواد الأساسية المكونة للوشاح . ويتفق هذا الاستنتاج مع بعض الأدلة القليلة غير المباشرة والمتاحة والمتعلقة بالمكونات الصخرية للجزء العلوى من الوشاح . فقد نستطيع الحصول على بعض الأدلة من العينات النادرة من صخور الوشاح الموجودة فى أنابيب الكمبرليت kimberlite pipes ، وهى كتل صخرية ضيقة تشبه الأنابيب مكونة من صخور نارية متداخلة تحتوى أحيانا على بلورات من الماس ، وهى توجد متداخلة فى قشور القشرة الأرضية إلا أنها تنشأ فى أعماق الوشاح .

3. اللب

تتأثر كل من الموجات الأولية والثانوية بشدة بالحد الموجود عند عمق حوالى 2900 كم (شكل 21.16). فعندما تصل الموجات P إلى هذا الحد ، فإنها تنعكس وتنكسر بقوة بحيث يشكل هذا الحد ظلاً للموجات الأولية ، وهى مساحة على سطح الأرض تقابل البؤرة السطحية ، حيث لايلاحظ وجود أى موجات أولية (موجات P) . وقد استنتج الجيولوجيون أن الحد الموجود على عمق 2900 كم هو الحد الفاصل بين الوشاح واللب ، حيث أن هذا الحد يمكن تميزه بوضوح . ويشكل هذا الحد نفسه ظلا للموجات الثانوية أكثر وضوحا . ولا يرجع السبب هنا إلى الانعكاس أو الانكسار ، بل إلى حقيقة أن الموجات الثانوية لا تنفذ فى السوائل. ومن دراستنا لسلوك الموجات الثانوية ومن نطاق الظل الضخم لموجات S ، يمكن أن نستنتج أن اللب الخارجى يكون سائلا .

ولا تستطيع الموجات الزلزالية أن تدلنا على تركيب اللب ، إلا أنها يمكن أن تساعدنا فى التنبؤ بذلك . وتدل سرعة الموجات الزلزالية المحسوبة من زمن الانتقال أن كثافة الصخور تزيد ببطء من حوالى 3.3 جم/ سم^3 عند أعلى الوشاح إلى 5.5 جم/ سم^3 عند الجزء السفلى من الوشاح . ويقدر متوسط كثافة الكرة الأرضية عامة 5.5 جم/ سم^3 . ولكى تتم معادلة القشرة والوشاح الأقل كثافة ، فإن اللب يجب أن يكون مكونا من مادة لها كثافة تتراوح بين 10-11 جم/ سم^3 على الأقل . ويمثل الحديد المادة الأكثر شيوعاً والأقرب لتحقيق ذلك . ويأتى الدليل على صحة هذا الاعتقاد من النيازك ، حيث يعتقد أن النيازك الحديدية iron meteorites تمثل مادة لب كوكب صغير قديم تحطم الآن. وتحتوى معظم النيازك الحديدية على القليل من النيكل ، وربما يكون الوضع مشابهاً فى لب الأرض. وحيث إن الموجات الثانوية لا تنتقل بعد حد اللب - الوشاح ، لذلك يستنتج أن اللب الخارجى يكون فى حالة سائلة، ويتكون فى معظمه من الحديد ، ولكنه يحتوى أيضاً على النيكل وبقايا معادن سيليكاتية من الوشاح السفلى والتى توجد فى حالة منصهرة .

4. اللب الداخلى

تدل انعكاسات الموجات الأولية (موجات P) على وجود لب داخلى صلب داخل اللب الخارجى السائل ، ويبدو أن تركيبهما متماثل عموما. وربما يرجع السبب فى التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة إلى تأثير الضغط على درجة حرارة انصهار الحديد . ويرتفع الضغط بالقرب من مركز الأرض إلى قيمة تعادل ملايين المرات الضغط الجوى العادى ، كما ترتفع درجة الحرارة ولكن ليس إلى الدرجة التى تلغى تأثير الضغط. وتتعادل درجة الحرارة والضغط عند قاعدة الوشاح (عند عمق 2900 كم) وإلى عمق 5350 كم بحيث يكون اللب فى الحالة السائلة. ولكن يوجد حد انكسار وانعكاس واضح عند عمق 5350 كم ، وربما يمثل هذا الحد الانتقال من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. ومن الواضح أن الضغط يرتفع من عمق 5350 كم وحتى مركز الأرض ، بحيث يستطيع التغلب على تأثير الحرارة ، ويكون الحديد فى حالة صلبة ليكوّن لب الأرض الصلب .

جـ. الطبقات المختلفة الخصائص الفيزيائية فى الوشاح

لقد أوضحت الدراسات المختلفة أنه لا توجد اختلافات فى المكونات الصخرية للوشاح. وعلى الرغم من أن سرعة الموجات الزلزالية تزداد عموما فى الوشاح مع العمق ، إلا أن هناك عدة انقطاعات (تغيرات فى سرعة الموجات) ، والتى يبدو أنها نتيجة تغيرات فى الخصائص الفيزيائية للوشاح . فبين عمق 100 كم وهو الحد السفلى للقشرة الأرضية ، وعمق 350 كم تنخفض سرعة كل من الموجات الأولية والثانوية بوضوح ، وتعرف هذه الطبقة بين عمق 100 كم و 350 كم بنطاق السرعة المنخفضة **low-velocity zone** ، ويظهر هذا النطاق تحت قيعان المحيطات بشكل أكثر وضوحا عنه تحت القارات . ويقابل نطاق السرعة المنخفضة الغلاف اللدن (الاسثينوسفير) وهو طبقة تماثل فى مكوناتها الصخرية مكونات الوشاح أعلاها مباشرة ، إلا أنها أقل فى الصلابة rigidity وأقل فى المرونة elasticity أيضا، مع أنها أكثر لدونة ductile عن المناطق المجاورة لها .

والتفسير المقبول لوجود نطاق السرعة المنخفضة ، هو أن التدرج الحرارى للأرض geothermal gradient فى المنطقة بين 100 كم حتى 350 كم يصل

إلى درجات حرارة قريبة من بداية الانصهار الجزئى لصخر الوشاح . وإذا كان هذا التفسير صحيحا فإما أن شدة الصخر rock strength تنخفض بشكل حاد عند درجات الحرارة القريبة من الانصهار، وإما أن الانصهار يبدأ وتتكون كمية صغيرة من السوائل التى تكوّن طبقة رقيقة جدا حول حبيبات المعادن ، والتى تعمل على تخفيف الاحتكاك . ويجب أن تكون كمية المادة المنصهرة قليلة جدا -فى حالة افتراض حدوثها- لأن الموجات الثانوية (موجات S) تنتقل خلال هذا النطاق ، ونحن نعرف أن موجات -S لاتنتقل خلال السوائل . فأى سائل ، مثل غلالة سميكة من الزيت ، يعمل على تخفيف الاحتكاك بين حبيبات المعدن فى الوشاح ، ويعمل فى نفس الوقت على خفض سرعة الموجات نتيجة انخفاض صفات المرونة.

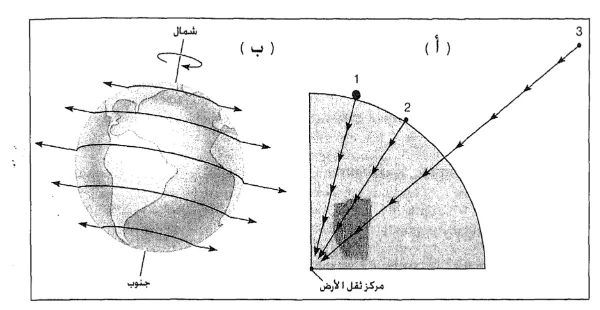
ويلاحظ أن نظرية تكتونية الألواح تفترض أن ألواح الغلاف الصخرى للأرض تنزلق فوق نطاق لدن إلى حد ما فى الوشاح . ومن هنا فإن وجود نطاق السرعة المنخفضة هذا يمثل عنصرا مهمًا لنظرية تكتونية الألواح ، حيث إنه يثبت وجود الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) . ويتطابق الحد العلوى لنطاق السرعة المنخفضة مع الحد السفلى للغلاف الصخرى . وهكذا ، فإن نطاق السرعة المنخفضة ينطبق مع الغلاف اللدن (الاسثينوسفير) .

وقد حددت انقطاعات أخرى عند مستويات أعمق فى الوشاح . وتمثل تلك الانقطاعات تغيرات فى البنية البلورية وليس فى المكونات المعدنية ، كما هو الحال عند الحدود (الانقطاعات) بين القشرة الأرضية والوشاح ، وبين الوشاح ولب الأرض . ويفترض الجيولوجيون أن الوشاح يتكون كله من المادة نفسها ، إلا أن البنية البلورية للمعادن تتغير مع العمق . حيث تزداد سرعة الموجات الزلزالية قليلا عند عمق 400 كم نتيجة للتغير فى تركيب المعادن . وتسمى عملية إعادة ترتيب (تعبئة) الذرات ، والتى تحدث نتيجة التغير فى درجات الحرارة والضغط بالانتقال متعدد الشكل polymorphic transition . فمعدن الأوليفين عند عمق 400 كم تعيد ذراته ترتيب نفسها فى معدن متعدد الشكل polymorph أكثر كثافة ، ويتحول إلى تركيب يشبه ذلك الموجود فى عائلة من المعادن تعرف باسم سبينيل spinels (معدن الماجنيتيت أحد المعادن التى تضمها تلك المجموعة).

وهناك زيادة فى السرعة تحدث عند عمق 670 كم ، وهذا الانقطاع من الصعب تفسيره ، على الرغم من افتراض بعض العلماء أنه يحدث عند هذا الحد تكسر للمعادن إلى أكاسيد فلزات مثل أكسيد الحديد FeO وأكسيد الماغنسيوم MgO وأكسيد السيليكون SiO_2. وهناك انقطاع ثالث يوجد عند عمق حوالى 1050 كم حيث تزداد عنده سرعة موجات P مرة أخرى. وتقع تلك الانقطاعات الثلاثة داخل نطاق يطلق عليه النطاق الانتقالى **transitional zone** والذى يفصل بين الوشاح العلوى والوشاح السفلى.

VI. الجاذبية الأرضية وتوازن القشرة الأرضية

أوضح سير إسحق نيوتن (1642-1727م) Sir Isaac Newton فى قانونه العام عن الجاذبية أن قوة الجذب بين كتلتين تتناسب طرديا مع مادة تلك الكتلتين وعكسياً مع مربع المسافة بين مركزيهما (شكل 22.16أ) . ولذلك فإن قوة الجذب بين كتلتين كبيرتين مثل القمر والأرض يكون أكبر من الجاذبية بين جسمين تكون كتلتها صغيرة . وعادة ، ما نشير إلى قوة الجاذبية بين جسم ما والأرض بأنه وزنه weight .



شكل (22.16):

أ) تجذب الجاذبية الأرضية كل الأجسام نحو مركز ثقل الأرض . فالأجسام 1 و 2 تقع على البعد نفسه من مركز ثقل الأرض ، ولكن تكون قوة الجاذبية أكبر عند الجسم 1 نظرا لأنه أكثر ثقلا . أما الأجسام 2 و 3 واللذان لهما الكتلة نفسها ، فإن الجاذبية الأرضية عند 3 تكون أقل أربع مرات منها عند 2 ويرجع ذلك إلى أن المسافة من مركز ثقل الأرض إلى 3 تكون ضعف المسافة من ذلك المركز إلى 2 .

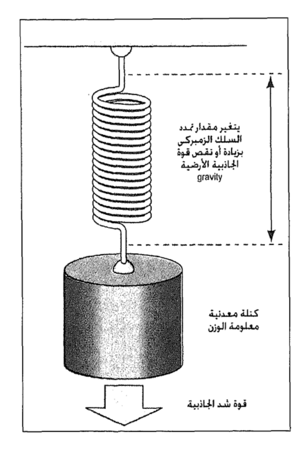
ب) يولد دوران الأرض قوة طرد مركزية تضاد قوة الجاذبية . وتكون قيمة قوة الطرد المركزى صفرا عند الأقطاب ، وتصل إلى قيمتها القصوى عند خط الاستواء .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

ومن المفترض أن تكون الجاذبية الأرضية ثابتة فى كل مكان على سطح الأرض ، إذا كانت الأرض كروية تماماً ومتجانسة كلية ولا تدور. وحيث أن الأرض تدور ، فإن قوة الطرد المركزى التى تنشأ عن هذا الدوران يعادلها جزئياً قوة الجاذبية الأرضية (شكل 22.16ب).

وقد أوضحت القياسات الدقيقة أن الأرض ليست كروية تماماً ، بل هى عبارة عن جسم بيضاوى مسطح قليلاً عند الأقطاب ومنتفخ قليلاً عند خط الاستواء. ويكون نصف قطر الأرض عند خط الاستواء أكبر بحوالى 21 كم منه عند الأقطاب. وحيث أن قوة الجاذبية التثاقلية بين كتلتين تتناسب عكسيا مع مربع المسافة بين مركزيهما ، فإن الجذب الذى تسببه الجاذبية الأرضية gravity على جسم عند أقطاب الأرض يكون أكبر قليلاً منه عند خط الاستواء . فالرجل الذى يزن حوالى 80.5 كجم عند القطب الشمالى نلاحظ أن وزنه ينقص ببطء وثبات إلى 80 كجم عند انتقاله إلى خط الاستواء . وإذا لاحظ الشخص المنتقل من القطب الشمالى إلى خط الاستواء وزنه بدقة ، فإنه سيلاحظ أن وزنه يتغير بغير انتظام . ومن هنا ، فإننا نلاحظ أن الجاذبية الأرضية تتغير بغير انتظام . ولنفس السبب ، فإن وزن جسم ما يكون أقل قليلاً فوق سطح الأرض عن وزنه عند مستوى سطح البحر.

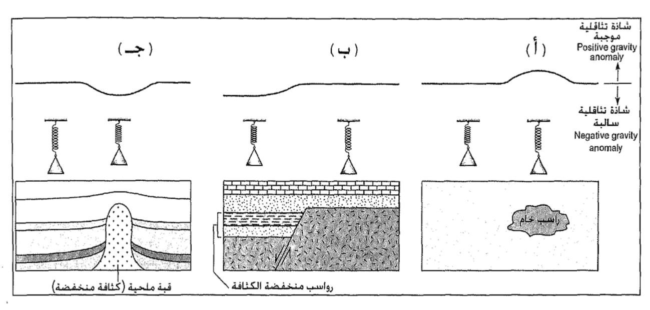
ويستخدم الجيوفيزيقيون جهازاً حساسا يسمى جرافيميتر (مقياس التثاقل) **gravimeter** لقياس الاختلافات فى قوة الجاذبية . وتشبه أجهزة التثاقل



شكل (23.16): يتكون الجرافيميتر (مقياس التثاقل) من كتلة ثقيلة من المعدن معلقة بزنبرك حساس. وتشد الكتلة الزنبرك بقوة تتغير بتغير الجاذبية الأرضية gravity من مكان لآخر، حيث يشد الزنبرك بدرجات مختلفة. وتوضع الكتلة المعدنية والزنبرك فى وعاء مفرغ من الهواء مع أدوات قياس حساسة.

مسجلات الزلازل (أجهزة السيزموجراف) ذات القصور الذاتى. فتتكون أجهزة التثاقل من كتلة ثقيلة معلقة فى زنبرك حساس(شكل 23.16). وحينما تكون الأرض مستقرة، ولا يوجد اهتزاز نتيجة الزلازل، فإن قوة الجذب التى تؤثر على الزنبرك نتيجة الكتلة الثقيلة تمثل مقياسًا دقيقًا للجذب التثاقلى gravitational pull، حيث إنها تستجيب لأى تغيرات فى الجاذبية الأرضية. وقد استخدمت أجهزة قياس التثاقل فى عمليات البحث عن خامات الهيدروكربونات وغيرها من الخامات المعدنية، حيث تأكد الجيولوجيون من وجود شاذات تثاقلية فوق الأجسام المدفونة، مثل معادن الخام (الركاز) ore minerals وقباب الملح. كما يمكن تحديد بعض التراكيب الجيولوجية باستخدام أجهزة مقياس التثاقل فوق سطح الأرض (شكل 24.16).

وتكون قياسات الجاذبية الأرضية فوق راسب من خام الحديد أعلى منها فوق راسب غير متماسك نظراً لارتفاع كثافة خام الحديد عن الراسب المحيط به، (شكل 24.16أ). وتسمى مثل تلك الانحرافات عن قوة الجاذبية الأرضية المتوقعة بشاذات تثاقلية gravity anomalies. وتدل القياسات فوق جسم خام الحديد على زيادة فى مادة كثيفة أو بصورة أبسط زيادة الكتلة mass excess بين سطح الأرض ومركزها، وتعتبر شاذة تثاقلية موجبة positive gravity anomaly، بينما يشير وجود شاذة تثاقلية سالبة negative gravity anomaly فوق رواسب منخفضة الكثافة إلى نقص الكتلة mass deficiency، نظرا لأن قوة جاذبية الأرض أقل عن المتوسط المتوقع، (شكل 24.16 ب). وتوجد أيضاً الشاذات التثاقلية



شكل (24.16) : قياس قوة الجاذبية الأرضية فوق أجسام مختلفة الكثافة .

أ) تشد الكتلة المعدنية المعلقة من زنبرك فى جهاز الجرافيمتر لأسفل فوق الجسم المعدنى الكثيف بقوة أكبر من قوة الشد فوق المناطق المجاورة لها ، مما يدل على وجود شاذة تثاقلية موجبة positive gravity anomaly فوق الجسم المعدنى .

ب) كما توجد شاذة تثاقلية سالبة فوق التراكيب المدفونة buried structures.

جـ) الملح الصخرى أقل كثافة من معظم أنواع الصخور الأخرى . ويعطى مسح الجاذبية للقبة الملحية شاذة تثاقلية سالبة .

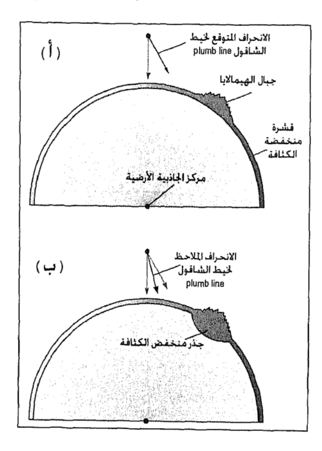
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

السالبة فوق قباب الملح (شكل 24.16جـ) وعند نطاقات الاندساس مما يشير إلى أن القشرة الأرضية ليست فى حالة اتزان.

أ. قاعدة توازن القشرة الأرضية

قام المساحون البريطانيون عند عمل أول مسح طوبوغرافى فى الهند بإجراء قياسات للمسافة بين مدينتين تقعان جنوب سلسلة جبال الهيمالايا وتبعدان عن بعضهما بحوالى 600 كم باستخدام طريقتين مختلفتين. وتعتمد الطريقة الأولى للقياس على طرق المساحة التقليدية ، بينما تعتمد الثانية على استخدام الطرق الفلكية. وعلى الرغم من أن الطريقتين يجب أن تعطيا النتائج نفسها ، إلا أنه لوحظ وجود فرق فى المسافة المقدرة بالطريقتين ، قدرت بحوالى 177 مترا.

ولقد أرجع هذا الفرق رغم صغره ، إلى انحراف خيط الشاقول plumb عن الرأسى نتيجة تأثير جبال الهيمالايا الضخمة المجاورة (الشاقول هو كتلة مخروطية من الرصاص معلقة فى خيط تستعمل لإسقاط نقطة رأسياً فى الفراغ لمسافة قصيرة) (شكل 25.16). وقد قدر أن تأثير جبال الهيمالايا يكون أكبر فى المدينة الأقرب لسلسلة الجبال . وبعد عدة سنوات ، قام برات J.H.Bratt بتقدير كتلة الهيمالايا ، كما قام بحساب الخطأ الذى ينتج عن تأثير جاذبية جبال الهيمالايا . وقد أصابته الدهشة عندما اكتشف أن الجبال يجب أن تسبب خطأ أكبر بثلاثة أضعاف الخطأ الملاحظ فعليا ، مما دفعه إلى اقترح وجود لب مركزى خال تحت تلك الجبال.



شكل (25.16):

أ) خط الشاقول plumb line يكون رأسيا دائما ، ويشير إلى مركز الجاذبية الأرضية . (الشاقول هو كتلة مخروطية من الرصاص معلقة فى خيط تستخدم لإسقاط نقطة رأسيا فى الفراغ لمسافة قصيرة) ، ومن المتوقع أن ينحرف خط الشاقول هذا قرب السلاسل الجبلية ، إذا كانت مكونة من مادة منخفضة الكثافة والجبال أكثر سمكا ، ومرتكزة على مادة ذات كثافة أعلى .

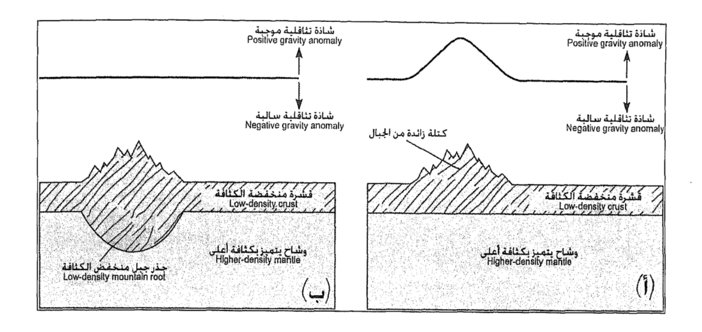
ب) وقد لوحظ عند مسح الهند أن الانحراف الحقيقى فى خط الشاقول أقل من المتوقع ، ويفسر ذلك بافتراض أن جذور جبال الهيمالايا تتكون من مادة ذات كثافة منخفضة .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

وبعد عدة سنوات ، وفى عام 1865م اقترح سير جورج إيرى Sir George Airy أنه بالإضافة إلى نتوء جبال الهيمالايا لأعلى فوق مستوى سطح البحر ، فإن جبال الهيمالايا والجبال الأخرى أيضاً ، تمتد لمسافة كبيرة تحت سطح الأرض وأن لها جذورا تتكون من مادة قليلة الكثافة. وبمعنى آخر ، فإن الجبال تطفو فوق صخور عالية الكثافة فى الأعماق ، وأن كتلة الجبال الزائدة فوق مستوى سطح البحر يعادلها نقص فى الكتلة عند الأعماق. وقد تسبب هذا النقص فى الكتلة فى انحراف خيط الشاقول أثناء عملية مسح الأرض فى الهند.

وقد أظهرت دراسة الجاذبية الأرضية أن الجبال لها جذور تتكون من مواد منخفضة الكثافة تمتد فى الوشاح. وإذا افترضنا عدم وجود هذا الجذر منخفض الكثافة ، فإن المسح التثاقلى gravity survey فى منطقة جبلية لابد أن يظهر شاذة تثاقلية موجبة هائلة. ويرجع السبب فى عدم وجود تلك الشاذة إلى أنه لا يوجد زيادة فى الكتلة. ولذلك فإن بعض صخور الوشاح الكثيف يجب أن يحل محلها صخور قشرة أخف (شكل 26.16). وقد أثبتت الدراسات الزلزالية أيضا وجود جذور منخفضة الكثافة تحت الجبال.

ويسمى اقتراح إيرى الآن بقاعدة **توازن القشرة الأرضية (أيزوستاسى) principle of isostasy** . وطبقاً لهذه القاعدة فإن القشرة الأرضية تكون فى حالة توازن ، ويمكن مقارنتها بطفو الكتل المكونة للغلاف الصخرى فوق الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) الأكبر كثافة. وتشير تلك القاعدة إلى وجود جذور من صخور القشرة الأرضية المنخفضة الكثافة ممتدة ومنغرسة فى صخور الوشاح الأكبر كثافة ؛ لتدعيم القارات



شكل (**26.16**):

أ. تدل قياسات الجاذبية على امتداد الخط المبين وجود شاذة تثاقلية موجبة فوق الجبال ، إذا كانت الجبال مكونة من قشرة أرضية أكبر سمكا وترتكز على مادة ذات كثافة أكبر أسفلها .

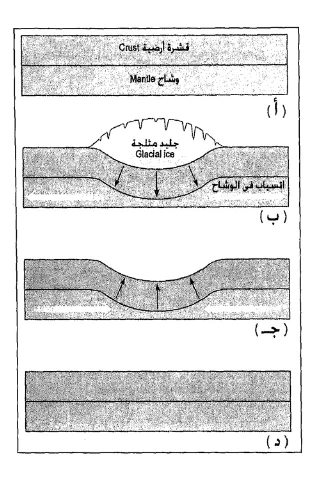
ب. ويدل مسح الجاذبية الفعلي عبر المناطق الجبلية أنه لايحدث تغير عن المتوقع ، وبالتالى لا توجد شاذة تثاقلية . ويدل ذلك على أن كتلة الجبال فوق سطح الأرض يجب أن تتعادل فى العمق بمادة ذات كثافة منخفضة تحل محل المادة الأكثر كثافة .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

والجبال. ويمكن فهم هذه القاعدة بسهولة إذا ما قورنت بجبل الجليد . فالجليد أقل كثافة من الماء بنسبة ضئيلة ، ولذلك فهو يطفو . وطبقاً لقاعدة أرشميدس للطفو ، فإن جبل الجليد يغوص فى الماء حتى يزيح حجما من الماء مساو لوزنه الكلى . وعندما يغوص جبل الجليد ليصل إلى حالة اتزان ، فإن حوالى 10٪ من حجمه تبرز فوق سطح الماء. فإذا انصهر بعض الجليد فوق مستوى سطح الماء ، فإن جبل الجليد يرتفع لكى يحافظ على النسبة نفسها من الجليد فوق سطح الماء وتحته.

وإذا كان مفهوم توازن القشرة الأرضية (أيزوستاسى) صحيحاً ، فإننا نتوقع أن تغوص القشرة الأرضية عند إضافة وزن جديد إليها . أما إذا أزيل هذا الوزن ، فإن القشرة الأرضية ترتفع (يمكن تخيل سفينة الشحن عندما تحمل بالضائع وعند تفريغها). وتعرف هذه الظاهرة بالارتداد الايزوستاسى isostatic rebound . ويوضح شكل (27.16) استجابة القشرة الأرضية لإضافة كتلة جليدية ضخمة ثم انصهار الجليد.

وهناك مثال تقليدى تمدنا به المثالج خلال العصور الجليدية . فعندما غطت فرش جليدية قارية continental ice sheets أجزاء من أمريكا الشمالية خلال حين البليستوسين ، فقد تسبب الوزن المضاف



شكل (27.16): شكل توضيحى يوضح كيف تتوازن القشرة الأرضية عند إضافة غطاء من جليد المثالج فوقها.

أ) شكل القشرة والوشاح قبل حدوث التثلج

ب) يضغط وزن جليد المثلجة glacier على القشرة فتغوص فى الوشاح

ج) وعندما ينصهر الجليد يبدأ الارتداد الأيزوستاسى isostatic rebound ، وتبدأ القشرة فى الرجوع إلى وضعها الأول

د) يكتمل الارتداد الايزوستاسى بعودة القشرة إلى وضعها الأصلى .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd eedition. West Publishing Company, Minneapolis).

لكتلة الجليد البالغ سمكها حوالى 3 كم فى تقعر القشرة الأرضية . وقد أعقب انصهار الجليد ، فى الفترة من 8000 إلى 10000 سنة مضت ارتفاع منطقة خليج هدسون Hudson Bay فى كندا ، ومازالت اسكندنافيا ، التى غطتها فريشة جليدية واسعة منذ حوالى 10000 سنة ، فى حالة ارتداد أيزوستاتيكى بمعدل يبلغ حوالى متراً واحدا لكل قرن . وقد ارتفعت المدن الساحلية فى اسكندنافيا بسرعة لدرجة أن أرصفة الشحن والتفريغ ، والتى بنيت منذ عدة قرون مضت تقع بعيدا عن الشاطئ الآن .

الملخص

1. الزلازل هى اهتزاز الأرض بسبب الموجات الزلزالية التى تنطلق من صدع ينكسر فجأة ، حيث تنطلق الطاقة المختزنة بمرونة فى صورة موجات زلزالية. وتقاس ذبذبات الزلازل باستخدام أجهزة السيزموجراف (مسجلات الزلازل) .

2. تنطلق الطاقة من بؤرة الزلزال للخارج كموجات داخلية (موجات جسمية)، تشمل نوعين : موجات أولية (موجات P) وهى موجات تضاغطية تنتقل فى المواد الصلبة والسائلة والغازية، وموجات ثانوية (موجات S) وهى موجات قص تنتقل خلال المواد الصلبة فقط،

وتتحرك بحوالى نصف سرعة موجات P. كما تتسبب طاقة الزلزال فى اهتزاز سطح الأرض أيضاً نتيجة الموجات السطحية التى تتحرك بسرعة أقل بكثير من الموجات الداخلية.

3. يمكن تحديد موقع البؤرة الزلزالية والمركز السطحى للزلزال عن طريق قياس الفرق بين زمن وصول كل من موجات P وموجات S.

4. يقاس مقدار الطاقة المنطلقة خلال زلزال على مقياس ريختر لقدر الزلازل. ويجرى التقدير من تسجيلات السيزموجراف (مسجلات الزلزال) للموجات الزلزالية الداخلية (الجسمية).

5. تنشأ حوالى 95٪ من زلازل الأرض فى الحزام حول الهادئ (80٪) وحزام البحر المتوسط - الهيمالايا (10٪). وتنشأ الخمسة فى المائة الباقية على امتداد حيود وسط المحيط وغيرها من الأماكن. وتحدد أحزمة الزلازل حدود الألواح التكتونية، حيث تنشأ معظم الزلازل بالقرب من حدود الألواح. كما تحدد الحركة الأولى للموجة الزلزالية اتجاه الحركة عند حد اللوح. وتوضح الأعداد القليلة من الزلازل التى تنشا بعيدا عن حدود الألواح مدى شدة القوى التكتونية التى تسبب التصدع داخل الألواح.

6. يمكن أن تتسبب اهتزازات الأرض فى دمار وتخريب المنشآت ، كما يمكن أن تحفز الانهيارات الأرضية. كما أن اندلاع الحرائق هو رعب آخر يمكن أن يلحق بالزلازل. وقد تتسبب الزلازل على قاع المحيطات فى حدوث موجات زلزالية بحرية (تسونامى) والتى قد تتسبب فى دمار شامل عندما تصل إلى المياه الضحلة عند الشواطئ .

7. يؤدى دراسة انعكاس وانكسار الموجات الزلزالية إلى استنتاج التركيب الداخلى للأرض ، حيث توجد حدود مميزة فى التركيب بين القشرة والوشاح، وبين الوشاح واللب الخارجى.

8. تحدد قاعدة القشرة الأرضية وجود انقطاع زلزالى مميز يسمى انقطاع موهوروفيتش. ويتراوح سمك القشرة من 20-60كم فى المناطق القارية ، بينما يكون أقل من 10كم تحت المحيطات . ويوجد داخل الوشاح نطاقين عند عمق 400 و670 كم حيث يتسبب تغير الكثافة فجأة فى وجود انقطاعات للموجات الزلزالية.

9. يتميز اللب بكثافته العالية ، ويستنتج من ذلك أنه يتكون من الحديد بالإضافة إلى كميات صغيرة من العناصر الأخرى. ويتميز اللب الخارجى بأنه سائل ؛ حيث إن الموجات الثانوية (موجات S) لا تنتقل خلاله ، بينما يكون اللب الداخلى فى حالة صلبة.

10. يوجد بين عمق 100 كم وحتى 350 كم نطاق السرعة المنخفضة . ويتطابق نطاق السرعة المنخفضة مع الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) . ويعلو الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) الغلاف الصخرى الذى يتميز بأنه صلب ، ويصل سمكه إلى 100 كم فى المتوسط.

11. توجد الأجزاء الخارجية من الأرض فى حالة توازن (أيزوستاسى) تقريباً. فمثلما تطفو جبال الجليد الضخمة فوق الماء فإن الغلاف الصخرى يطفو فوق الغلاف اللدن.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://www.gps.caltech.edu/seismo/seismo.page.html
http://www.eas.slu.edu/Earthquake_Center/earthquakecenter.html
http://www.geophys.washington.edu/seismosurfing.html
http://wwwneic.cr.usgs.gov/
http://sepwww.stanford.edu/oldsep/joe/fault_images/BayAreaSanAndreasFault.html

المصطلحات المهمة

English	العربية
aseismic ridge	حيد لا زلزالى
Benioff zone	نطاق بينى أوف
body waves	موجات داخلية (موجات جسمية)
earthquake	زلزال ـ هزة أرضية
elastic rebound theory	نظرية الارتداد المرن
epicenter	المركز السطحى للزلزال
focus	بؤرة (زلزالية)
gravimeter	جرافيمتر (مقياس التثاقل)
gravity anomalies	شاذات تثاقلية
intensity	شدة الزلزال
inertia	قصور ذاتى
isostasty, principle of	قاعدة توازن القشرة الأرضية (أيزوستاسى)
low-velocity zone	نطاق السرعة المنخفضة
magnitude	قدر الزلزال
M- discontinuity	انقطاع ـ إم
Modified Mercalli Intensity Scale	مقياس شدة ميركالى المعدل
Moho	موهو
Mohorovicic discontinuity	انقطاع مورهوروفيتش
primary waves	موجات أولية
Richter magnitude scale	مقياس ريختر لقدر الزلازل
secondary waves	موجات ثانوية
seismic belts	أحزمة زلزالية
seismic gap method	طريقة الفجوة الزلزالية
seismic sea waves	موجات بحرية زلزالية
seismic waves	موجات زلزالية
seismograph	سيزموجراف (مسجل الزلازل)
seismology	علم الزلازل
shadow zone	نطاق الظل
surface waves	موجات سطحية
transitional zone	نطاق انتقالى
tsunami	تسونامى

الأسئلة

1- ما أسباب الزلازل؟

2- ما العلاقة بين بؤرة الزلزال والمركز السطحى للزلزال المقابل لتلك البؤرة؟

3- كيف يمكن تسجيل وقياس الموجات الزلزالية؟ وكيف يمكن تحديد موقع المركز السطحى للزلزال من تسجيلات الزلازل؟ . اشرح كيف يمكن تحديد البؤرة الزلزالية.

4- اشرح الفرق بين الموجات الزلزالية الداخلية (الجسمية) والموجات السطحية. حدد نوعين من الموجات الزلزالية الداخلية واشرح الفرق بينهما.

5- وضح كيف يستخدم الجيولوجيون مقياس ريختر لقدر الزلازل لتقدير الطاقة المنطلقة من الزلازل ، وما أقل قدر لزلزال على مقياس ريختر يجعلنا نشعر بالزلزال ؟

6- ناقش باختصار الآثار المدمرة للزلازل.

7- كيف يؤثر الانعكاس والانكسار على مسار الموجات الزلزالية؟ كيف يمكن استخدام كل من الانكسار والانعكاس لتحديد قاعدة القشرة الأرضية؟ والحد بين اللب والوشاح؟

8- اشرح باختصار كيف يمكن استخدام الموجات الزلزالية لاستنتاج أن اللب الخارجى يكون سائل بينها اللب الداخلى فى حالة صلبة. كيف تعضد النيازك الحديدية، أن اللب يتكون فى معظمه من الحديد الفلزى؟

9- وضح كيف تختلف سرعة موجاتP فى الجرانيت عنها فى الجابرو والبريدوتيت.

10- ماالدليل الذى يرجح أن الغلاف اللدن (الاستينوسفير) فى حالة انصهار جزئى؟

11- ما الأحزمة الزلزالية ؟ وما علاقتها بالألواح التكتونية؟ اشرح كيف يمكن استخدام تسجيلات الموجات الزلزالية لتحديد حركات حدود الألواح. اذكر أنواع تلك الحدود.

12- كيف يمكن مقارنة بؤر الزلازل مع الأنواع الثلاثة لحدود الألواح؟

13- توجد أحيانا بعض الزلازل المدمرة داخل الألواح، بعيدا عن حدود الألواح. لماذا؟

14- اشرح الشاذات التثاقلية وكيف يمكن قياسها؟

15- اذكر بعض الأدلة على ارتباط شكل تضاريس سطح الأرض وتوازن القشرة الأرضية ، وما العلاقة بين تضاريس سطح الأرض وتوازن القشرة الأرضية (الايزوستاسى) ؟

16- كيف يمكنك استخدام الموجات الزلزالية لتحديد موقع غرفة صهارة (فى حالة منصهرة) فى القشرة؟

الفصل 17

تكتونية الألواح : نظرية شاملة

I. الأفكار الأولى عن الانجراف القارى

II. فرضية الانجراف القارى: فكرة قبل موعدها

III. دلائل الانجراف القارى

أ. التشابه بين التتابعات الصخرية وسلاسل الجبال

ب. دليل من المثالج

جـ. أدلة من الحفريات

د. المغناطيسية القديمة والتجوال القطبى

IV. انتشار قيعان المحيطات

أ. الانعكاسات المغناطيسية والانجراف القارى

ب. الحفر البحرى العميق: إثبات لفرضية انتشار قيعان المحيطات

V. نظرية تكتونية الألواح

أ. حدود الألواح

1. الحدود المتباعدة
2. الحدود المتقاربة
3. الحدود الناقلة

ب. حركة الألواح

1. الحركة النسبية للألواح
2. الحركات المطلقة للألواح
3. التغير فى سرعة الألواح
4. الميكانيكية المحركة لتكتونية الألواح

IV. تكتونية الألواح والرواسب المعدنية

حدثت ثورة فى العلوم الجيولوجية عندما عُرف أن جغرافية الكرة الأرضية تتغير باستمرار عبر الزمن . وعلى الرغم من أن نظرية تكتونية الألواح مازالت غير واضحة بدرجة كافية لدى الكثيرين ، إلا أن لتكتونية الألواح تأثيرا قويا على كل جوانب حياتنا . فمن المؤكد أن الزلازل والبراكين لا تتوزع بصورة عشوائية على سطح الأرض ، وإنما تحدث بالقرب من حواف الألواح . وعلاوة على ذلك ، فإن هناك علاقة بين الألواح وطرق تكوين وتوزيع عديد من الرواسب المعدنية المهمة ، مثل الخامات الفلزية. ولذلك يستخدم الجيولوجيون نظرية تكتونية الألواح فى تفسير تواجدات الرواسب المعروفة وفى البحث عن رواسب معدنية جديدة .

كما تشرح النظرية كيف تنشأ القارات وأحواض المحيطات وسلاسل الجبال ، والتى تؤثر على الغلاف الجوى للأرض ودورة الماء فى المحيطات اللتان تحددان وتؤثران بصورة أساسية فى مناخ الكرة الأرضية . ولذلك ، فقد أثرت حركة الألواح بصورة كبيرة على التوزيع الجغرافى للنباتات والحيوانات وتطورها وانقراضها .

وفى الوقت الحالى يمكن اعتبار نظرية تكتونية الألواح مقبولة عالميا تقريبا بين كافة الجيولوجيين . وقد أدى تطبيقها إلى فهم كيف تطورت الأرض منذ نشأتها وحتى الآن . وتفسر تلك النظرية الشاملة عديدًا من الأحداث الجيولوجية التى يبدو أنه لا رابط بينها ، مما سمح للجيولوجيين بالنظر إلى تلك الأحداث كجزء من عملية مستمرة ، أكثر منها سلسلة من الأحداث المنعزلة غير المترابطة .

وسوف نستعرض فى الأجزاء التالية الفرضيات المختلفة التى سبقت نظرية تكتونية الألواح ، لشرح الدلائل التى أدت إلى قبول البعض لفكرة حركة القارات والبعض الآخر لرفضها .

I. الأفكار الأولى عن الانجراف القارى

لقد كان معروفا منذ أمد بعيد أن جغرافية الأرض تتغير عبر الزمان . فقد لاحظ سير فرانسيس بيكون Sir Francis Bacon عام 1620م التشابه الكبير بين خطوط الشواطئ الغربية لأفريقيا وخطوط الشواطئ الشرقية لأمريكا الجنوبية. إلا أن بيكون لم يجد أى علاقة بين القارات القديمة والحديثة ، وأن تلك القارات ربما كانت مختلفة فى الماضى . وفى عام 1801م لاحظ الكسندر فون همبولت الملاحظة نفسها ، ولكنه أرجع ذلك التشابه إلى التعرية على امتداد وادى كبير ، ولم يرجعها إلى تكسر قارة أكبر.

كما ذكر انطونيو سنيدر بليجرينى Antonio Snider - Pellegrini 1858م فى كتابه "الخلق وأسراره" وهو أحد المراجع الأولى عن الانجراف القارى ، أن كل القارات كانت متصلة مع بعضها خلال عصر البنسلفانى (العصر الكربونى المتأخر) ثم انفصلت بعد ذلك . وقد بنى اعتقاده هذا اعتمادا على التشابه بين الحفريات النباتية فى طبقات الفحم من زمن البنسلفانى فى أوروبا وأمريكا الشمالية . وقد عزى سنيدر انفصال القارات إلى طوفان توراتى (مذكور فى التوراة) .

وفى نهاية القرن التاسع عشر لاحظ الجيولوجى النمساوى إدوارد سويس Edward Suess التشابه

بين الحفريات النباتية لحقب الحياة القديمة (الباليوزوى) المتأخر فى الهند واستراليا وأفريقيا وأنتاركتيكا وأمريكا الجنوبية ، علاوة على الدليل على التثلج فى تتابعات الصخور الموجودة فى تلك القارات . وفى عام 1885 م اقترح سويس اسم **أرض الجندوانا Gondwanaland** (أو جندوانا **Gondwana** كما تسمى أحيانا) لقارة عظمى مكونة من كل القارات الجنوبية . وجندوانا هو إقليم يقع فى شرق الهند حيث وجدت أدلة على حدوث تثلج يغطى منطقة واسعة ، بالإضافة إلى وفرة حفريات **الجلوسوبتيريس** ***Glossopteris*** النباتية . وقد اعتقد سويس أن توزيع الحفريات النباتية والرواسب الثلجية يرجع إلى وجود جسور ممتدة تصل بين القارات ثم غرقت بعد ذلك تحت المحيطات .

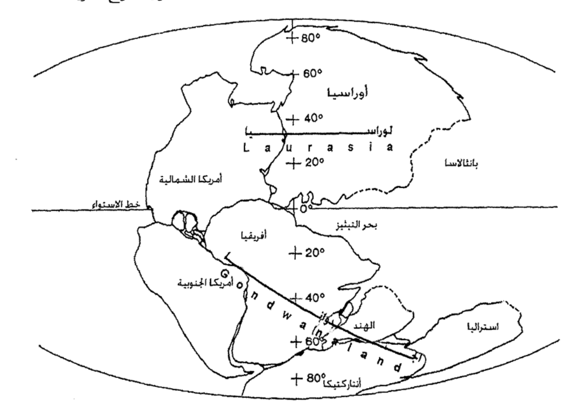
وفى عام 1910م نشر الجيولوجى الأمريكى فرانك تيلور Frank B. Taylor بحثا قدم فيه نظريته الخاصة عن الانجراف القارى ، وذكر فيه أن تكوّن سلاسل الجبال يكون نتيجة للحركة الجانبية للقارات . كما اعتبر تايلور القارات الحالية أجزاء من قارات قطبية أكبر تكسرت فى النهاية وهاجرت نحو خط الاستواء بعد أن بطأت الكرة الأرضية من دورانها نتيجة لقوى مد وجزر هائلة . وقد افترض تيلور أن قوى المد والجزر قد نشأت منذ حوالى 100 مليون سنة فقط.

وعلى الرغم من معرفتنا أن الميكانيكية التى اقترحها تيلور غير صحيحة ، إلا أن أحد أهم مساهماته كان اقتراحه أن حيود وسط الأطلنطى Mid-Atlantic Ridge والتى اكتشفتها البعثات البريطانية خلال الفترة 1872-1876م ، ربما يحدد الموقع الذى انفصلت على امتداده قارة قديمة لتكوّن المحيط الأطلنطى الحالى .

II. فرضية الانجراف القارى: فكرة قبل موعدها

يرجع الفضل عموما فى تطور فرضية **الانجراف القارى continental drift** إلى عالم الأرصاد الجوية ألفريد فاجنر Alfred Wegener . ففى عام 1912م قدم فاجنر أفكاره الأولى عن القارات المتحركة . وقد اقترح فاجنر فى كتابه المنشور عام 1915م بعنوان "أصل القارات والمحيطات" أن كل الكتل الأرضية كانت متحدة أصلا فى قارة عظمى واحدة أسماها **بانجيا Pangaea** (القارة الأم) من اليونانية بمعنى "كل الأرض" (شكل 1.17) . وقد أوضح فاجنر مفهومه عن تحرك القارات فى سلسلة من الخرائط توضح انفصال البانجيا قبل حوالى 200 مليون سنة ، وتحرك القارات المختلفة إلى مواقعها الحالية . وقد جمع فاجنر كمية هائلة من الأدلة الجيولوجية والحفرية والمناخية لدعم فرضية الانجراف القارى . وقد كان رد فعل العلماء الأولى لأفكاره متباينا . حيث عارضها كثير من العلماء وخاصة فى أمريكا الشمالية ، بينما جاءه بعض التأييد من علماء آخرين. وقد كانت العقبة الأساسية لقبول فرضية الانجراف القارى هى تفسير الميكانيكية التى تحركت بها قارات مكونة أساسا من الصخور الجرانيتية فوق قشرة محيطية بازلتية ذات كثافة أعلى .

ومع ذلك فقد طور الجيولوجى البارز من جنوب أفريقيا الكسندر دى توا Alexander du Toit البراهين التى قدمها فاجنر ، وجمع المزيد من الأدلة الجيولوجية والحفرية لدعم الانجراف القارى . وفى عام 1937م نشر دى توا كتابه باسم "قارتنا المتجولة" ، حيث قارن رواسب الجليد فى قارة الجندوانا برواسب الفحم الموجودة فى صخور من العمر نفسه فى قارات النصف الشمالى للكرة الأرضية. ولكى يحل هذه



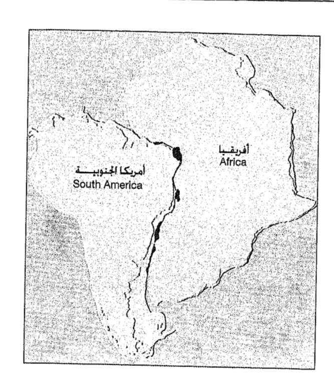
شكل (**1.17**): البانجيا (القارة الأم) Pangaea التى تكونت قبل 220 مليون سنة عند نهاية حقب الباليوزوى . وقد رسمت القارات الحالية بحيث يسهل تمييزها فى هذا الشكل . كما أن المحيط العملاق فى هذا الوقت والذى أطلق عليه البانثالاسا Panthalassa قد انكمش ويتمثل حاليا بالمحيط الهادىء . وتشمل لوراسيا كلا من أمريكا الشمالية وجرينلاند ، بالإضافة إلى أوروبا وآسيا ، بينما تشمل الجندوانا بقية الكتل القارية.
(After Abbott. P. L.. 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill. Boston).

الإشكالية ، حرك دى توا قارات الجندوانا إلى القطب الجنوبى وجمع القارات الشمالية الموجود بها رواسب الفحم مع بعضها عند خط الاستواء . وسمى هذه الكتل الشمالية لوراسيا **Laurasia** وهى تشمل أمريكا الشمالية وجرينلاند وأوروبا وآسيا الحالية (باستثناء الهند).

وعلى الرغم من هذه الأدلة والبراهين ، إلا أن معظم الجيولوجيين استمروا فى معارضتهم وعدم قبولهم لفكرة تحرك القارات . وقد استمر الوضع على ما هو عليه حتى عام 1960 م حينما قدمت بحوث علم المحيطات أدلة مقنعة أن القارات كانت متصلة يوما ما ثم انفصلت لاحقا ، مما أدى آخر الأمر إلى قبول واسع لفرضية الانجراف القارى .

III. دلائل الانجراف القارى

لقد كان فاجنر مأخوذا بالتشابه بين خطوط شواطئ القارات على جانبى المحيط الأطلنطى ، خاصة بين أمريكا الجنوبية وأفريقيا ، مثل من سبقه من العلماء . وقد أوضح فاجنر أن ذلك التشابه هو دليل على أن القارات كانت متصلة يوما ما كقارة عظمى ، ثم انشطرت لاحقا . وقد لقيت محاولة فاجنر لإعادة تركيب جانبى المحيط الأطلنطى اعتمادا على تشابه الشواطئ الحالية معارضة من العلماء ، نظرا للتغير الدائم لخطوط الشواطئ نتيجة التعرية والترسيب . لذلك فلو أن القارات قد انفصلت خلال حقب الحياة الوسطى (الميزوزى) كما اقترح فاجنر فإن خطوط الشواطئ الحالية لها لن تتطابق تماما على بعضها.



شكل (2.17): مطابقة الكتل القارية عبر المحيط الأطلنطى عند حواف المنحدرات القارية المغمورة، وليس عند خطوط الشواطىء الحالية . وقد ظهرت الحواف المغمورة للقارات بشكل منقط ، ويشير اللون الأسود إلى المناطق التى تراكبت فيها حواف القارات فوق بعضها (وهى المناطق التى تراكبت فوقها الصخور الرسوبية) بينما تعكس الأجزاء البيضاء بينها المناطق الناقصة من عملية التراكب .

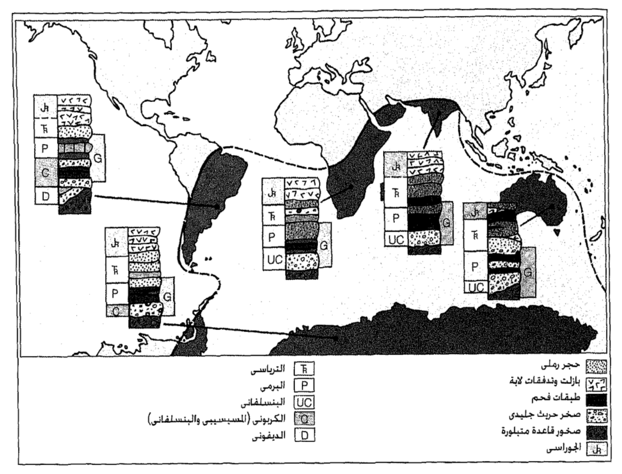
(After Bullard, E.C., Everett, J.E. and Smith, A.G., 1965: The Fit of the continents around the Atlantic, philosophical transaction of the Royal Soc., London).

وقد كان من المنطقى أن تتم مطابقة القارات مع بعضها على امتداد المنحدر القارى continental slope حيث تقل التعرية إلى أقصى درجة . ويجب ملاحظة أن الحافة الحقيقية للقارة تكون تحت المنحدر القارى حيث تتغير القشرة القارية إلى قشرة محيطية . وفى عام 1965م قام سير إدوارد بولارد Sir Edward Bullard الإنجليزى واثنان من مرافقيه برسم خريطة باستخدام الحاسوب (الكمبيوتر) ، تم فيها مطابقة القارات عند عمق 2000 متر عند حواف المنحدرات القارية . ويوضح شكل (2.17) التطابق الواضح بين حواف القارات ، وعلى الرغم من وجود بعض المناطق القليلة التى تتراكب فيها حواف القارات . ويرجع هذا التراكب إلى وجود مجارى مائية رسبت كميات كبيرة من الرواسب فى مناطق مختلفة .

أ. التشابه بين التتابعات الصخرية وسلاسل الجبال

إذا كانت القارات قد اتصلت ببعضها يوما ما ، فإنه من المتوقع أن تتماثل الصخور وسلاسل الجبال التى تتبع نفس العمر فى المناطق المتقابلة على القارات المتباعدة إلى حد بعيد . وهذا هو الحال فى قارة الجندوانا (شكل 3.17) . حيث تتماثل تقريبا تتابعات الصخور البحرية وغير البحرية والجليدية التى تتبع البنسلفانى (التابع للعصر الكربونى المتأخر) إلى الجوارسى ، فى كل قارات الجندوانا الخمس ، مما يشير إلى أن تلك القارات كانت ملتحمة ببعضها يوما ما .

ويدعم اتجاه عديد من سلاسل الجبال الرئيسية فرضية الانجراف القارى ، حيث تنتهى هذه السلاسل من الجبال ظاهريا عند خط الشاطئ لقارة ما لتستمر ظاهريا فى قارة أخرى عبر المحيط . فمثلا تتجه جبال الأبالاش فى أمريكا الشمالية فى اتجاه الشمال الشرقى فى شرق الولايات المتحدة الأمريكية وكندا ، ثم تنتهى فجأة عند شاطئ نيوفوندلاند (شكل 4.17) . وتوجد سلاسل جبال تتبع العمر نفسه ولها نظام الطى نفسه فى شرق جرينلاند وأيرلندا وبريطانيا والنرويج . وعلى الرغم من أن المحيط الأطلنطى يفصل بين تلك



شكل (3.17) : تتماثل تقريبا فى كل قارات الجندوانا التتابعات البحرية وغير البحرية والجليدية من البنسلفانى التابع للعصر الكربونى المتأخر حتى الجوراسى . ويرجع هذا التشابه القوى إلى أن القارات المكونة للجندوانا كانت ملتحمة ببعضها فى يوم ما . ويشير الحرف (G) إلى مناطق انتشار فلورة الجلوسوبتيريس .

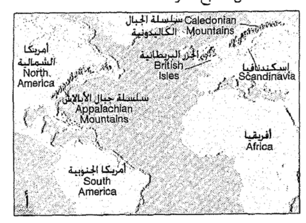
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

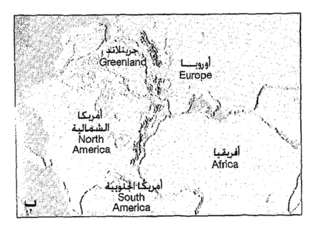
السلاسل الجبلية ، إلا أنها تكوّن سلسلة جبال مستمرة، حينما يعاد وضع تلك القارات بجانب بعضها البعض.

ب. دليل من المثالج

لقد غطت مثالج glaciers ضخمة مساحات قارية كبيرة فى نصف الكرة الأرضية الجنوبى فى حقب الحياة القديمة (الباليوزوى) المتأخر . ويدل على حدوث تلك المثالج وجود طبقات من الحريث till (وهى رواسب كونتها المثالج) ، بالإضافة إلى الحزوز الجليدية الموجودة فى صخر الأساس الذى يسفل رواسب الحريث . وتدل الحفريات والصخور الرسوبية التى تتبع العمر نفسه فى نصف الكرة الأرضية الشمالى على عدم وجود أى أدلة على التثلج ، وإنما تدل الحفريات النباتية فى الفحم على أن مناخ نصف الكرة الشمالى كان مناخا مداريا خلال الزمن نفسه الذى سادت فيه المثالج فى نصف الكرة الأرضية الجنوبى .

وتقع اليوم كل قارات الجندوانا ما عدا القارة القطبية الجنوبية (الأنتاركتيكا) بالقرب من خط الاستواء ، حيث يسود بها مناخ مدارى إلى شبه مدارى. وتدل الخرائط التى رُسمت للحزوز الجليدية glacial striations فى صخور الأساس فى أستراليا والهند وأمريكا الجنوبية أن المثالج تحركت من المحيطات إلى



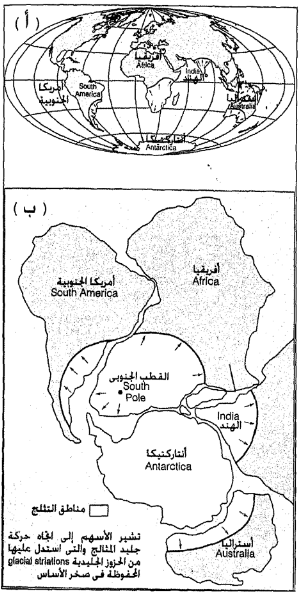


شكل (**4.17**): مضاهاة أحزمة الجبال عبر شمال المحيط الأطلنطي.

أ. تمتد حاليا جبال الأبالاش على امتداد الشاطىء الشرقى لأمريكا الشمالية ، وتختفى فجأة عند شاطىء نيوفوندلان . ويلاحظ وجود جبال لها العمر والتركيب نفسيهما تقريبا فى الجزر البريطانية واسكندنافيا .

ب. وإذا أعيد وضع الكتل القارية فى أوضاعها قبل عملية الانجراف فإن هذه السلاسل الجبلية القديمة ستكون حزاما مستمرا تقريبا . وقد تكونت تلك السلاسل الجبلية المطوية قبل حوالى 300 مليون سنة تقريبا ، عندما اصطدمت الكتل القارية ببعضها أثناء تكون القارة العملاقة المسماة بالبانجيا .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).



شكل (**5.17**):

أ- إذا كانت القارات لم تتحرك فى الماضى ، فإن الحزوز الجليدية **glacial striations** فى الباليوزوى المتأخر والمحفوظة فى صخور الأساس فى استراليا والهند وأفريقيا وأمريكا الجنوبية تدل على أن حركة الجليد لكل قارة كانت من المحيطات إلى اليابسة فى مناخ مدارى إلى شبه مدارى ، وهو احتمال بعيد الحدوث تماما .

ب- أما إذا أعيد تجميع القارات بحيث تقع جنوب أفريقيا فى القطب الجنوبى ، فإن حركة جليد المثالج المتكونة فى مناخ قطبى ، والمستدل عليها من الحزوز الجليدية ، تكون من منطقة مركزية سميكة فوق اليابسة إلى الخارج نحو حوافها.

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

داخل اليابسة (شكل5.17) . ويبدوا أن هذا التفسير بعيد الاحتمال ، حيث إن المثالج القارية الكبيرة تنساب من مناطق التجمع المركزية إلى الخارج ناحية البحر .

فإذا لم تكن القارات قد تحركت فى الماضى ، فإن ذلك يستوجب أن نفسر كيف تحركت المثالج من المحيطات إلى الأرض ، وكيف تكونت مثالج قارية على مساحات شاسعة بالقرب من خط الاستواء . ولكن إذا أعيد تجميع القارات فى كتلة واحدة بحيث يكون جنوب أفريقيا عند القطب الجنوبى ، فإن اتجاه حركة المثالج القارية فى حقب الحياة القديمة المتأخر يمكن تفسيرها. وعلاوة على ذلك فإن هذا الترتيب الجغرافى يضع القارات الشمالية فى قارة واحدة هى قارة **لوراسيا Laurasia** بالقرب من المنطقة المدارية ، مما يفسر وجود الحفريات النباتية فى الفحم .

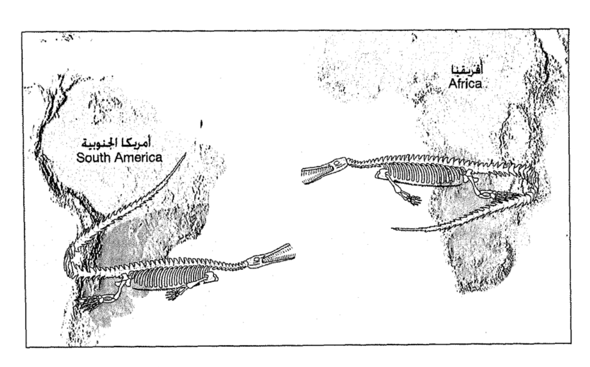
جـ. أدلة من الحفريات

تأتى بعض الأدلة القوية على فرضية الانجراف القارى من السجل الحفرى . فتوجد حفريات من **فلورة جلوسوبتيريس*Glossopteris*** النباتية فى رواسب الفحم من عمر البنسلفانى (الكربونى المتأخر) والبرمى على قارات الجندوانا الخمس (شكل 3.17). وعلى الرغم من أن حبوب اللقاح والأبواغ spores تنتشر لمسافات واسعة بالرياح ، إلا أن نباتات الجلوسوبتيريس كانت تنتج حبوب لقاح كبيرة لدرجة يصعب نقلها بالرياح . وعلى فرض أن تلك الحبوب انتقلت عبر المحيطات ، فإنه من المحتمل ألا تبقى قادرة على الحياة والنمو فى المياه المالحة لأى فترة زمنية .

وحيث إن المناخ الحالى للكتل القارية التى كانت تكوّن الجندوانا ، والتى تشمل أمريكا الجنوبية وأفريقيا والهند واستراليا والقارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) ، يتنوع تنوعا شديدا ويتراوح بين المناخ المدارى فى القارات الاستوائية إلى المناخ القطبى فى القارة القطبية الجنوبية ، فقد اقترح فاجنر أن هذه القارات لابد أنها كانت ملتحمة ، بحيث إن تلك المناطق المنفصلة والبعيدة عن بعضها حاليا كانت تقع كلها فى يوم ما على حزام مناخى واحد .

كما تقدم أيضا الحفريات الحيوانية دليلا قويا على الانجراف القارى . ويمثل جنس ميزوسورس *Mesosaurus* وهو من زواحف الماء العذب التى تتواجد حفرياتها فى صخور العصر البرمى فى مناطق محددة فى البرازيل وجنوب أفريقيا فقط ولا يوجد فى مناطق أخرى من العالم (شكل 6.17). ونظرا للاختلاف البين فى فسيولوجية حيوانات المياه العذبة عن فسيولوجية حيوانات المياه المالحة ، فإنه من الصعب تخيل كيف يعوم زاحف ماء عذب عبر المحيط الأطلنطى ليجد بيئة ماء عذب أخرى مشابهة تقريبا لبيئته الأصلية . وعلاوة على ذلك، وبافتراض أن الميزوسورس قد عبر المحيط الأطلنطى فإن بقاياه يجب أن تكون منتشرة فى صخور قاع هذا المحيط . وحيث إن قاع المحيط الأطلنطى لا يحتوى على أى بقايا للميزوسورس ، فإنه من المنطقى افتراض أن الميزوسورس قد عاش فى المناطق المتقابلة حاليا من قارتى أمريكا الجنوبية وأفريقيا ، وأن هاتين القارتين كانتا متحدتين فى قارة واحدة .

وعلى الرغم من أن الأدلة التى ساقها فاجنر ومؤيدوه لإثبات الانجراف القارى تبدو قوية ومقنعة ، إلا أن نقص الميكانيكية المناسبة لشرح حركة القارات وقفت حائلا أمام القبول الواسع لفكرة الانجراف القارى . واستمرت حالة عدم القبول هذه حتى أثبتت الأدلة الجديدة من دراسة المجال المغناطيسى للأرض وبحوث علوم البحار أن أحواض المحيطات حديثة العمر (أقل من 200 مليون سنة) ، مما أدى إلى عودة الاهتمام للانجراف القارى مرة ثانية .



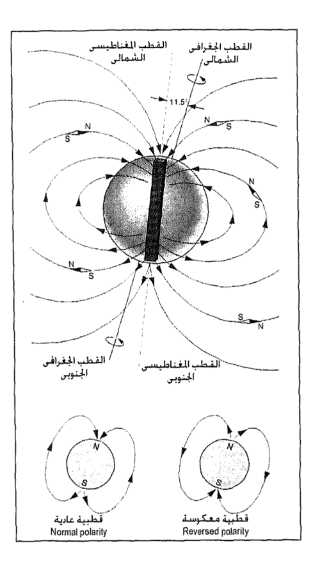
شكل (6.17): وجدت حفريات الميزوسورس Mesosaurus فقط على كلا جانبي جنوب المحيط الأطلنطي وليس فى أى مكان آخر من العالم. وتساعد بقايا هذه الحفريات وغيرها من الكائنات الحية الموجودة على قارتى أفريقيا وأمريكا الجنوبية على ربط هذه الكتل القارية ببعضها خلال حقبى الحياة القديمة المتأخر والحياة الوسطى المبكر.
(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

د. المغناطيسية القديمة والتجوال القطبى

لقد أتت بعض أهم الأدلة المؤيدة للانجراف القارى من دراسة المغناطيسية القديمة للأرض. فقد درس بعض الجيولوجيين فى أوائل الخمسينيات من القرن العشرين التغيرات التى حدثت فى الماضى للمجال المغناطيسى للأرض، من أجل الوصول لفهم أفضل للمجال المغناطيسى الحالى. وقد أدت تلك الدراسة، وكما يحدث عادة فى العلم، إلى اكتشافات أخرى مهمة منها أن أحواض المحيطات هى معالم أرضية حديثة جيولوجيا، وأن القارات قد تحركت فعلا فى الماضى كما اقترح فاجنر والباحثون الآخرون.

وكما سبق أن أوضحنا فإن موقع القطبين المغناطيسيين للأرض يقابلان تقريبا موقع القطبين الجغرافيين للأرض (شكل 7.17). وعندما تبرد الصهارة فإن المعادن الحاوية للحديد ترتب نفسها فى اتجاه المجال المغناطيسى للأرض، عندما تصل تلك المعادن إلى نقطة كورى Curie point. ونقطة كورى هى الحرارة التى لا يستطيع المعدن الاحتفاظ بأية مغناطيسية دائمة فوقها. وهكذا يتم تسجيل كل من اتجاه وشدة المجال المغناطيسى للأرض. ويمكن استخدام تلك المعلومة فى تحديد موقع قطبى الأرض المغناطيسيان وخط العرض الذى تواجد عنده الصخر أثناء تكوينه.

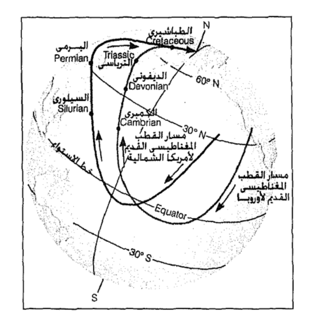
وقد أظهرت الدراسات التى قام بها الجيوفيزيائى رنكورن S.K. Runcorn والعاملون معه أن موقع القطب المغناطيسى القديم والذى حُدد من المغناطيسية القديمة فى طفوح اللابة ذات الأعمار المختلفة بأوروبا، قد تغير كثيرا. فقد وجدوا أنه خلال 500 مليون سنة



شكل (7.17): المجال المغناطيسى للأرض: رُسِم المجال الداخلى للأرض كقضيب مغناطيسى كبير لتبسيط المجال الحقيقى للأرض، الذى يكون أكثر تعقيدا من ذلك . ويشير اتجاه الشمال والجنوب فى الشكلين الصغيرين إلى الشمال والجنوب الجغرافى . ويوضح الشكل اتجاه الخطوط المغناطيسية فى القطبية العادية والمعكوسة .

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

مضت قد تحرك (تجوالا ظاهريا) القطب الشمالى من المحيط الهادى عبر شرق فشمال آسيا حتى وصل إلى موقعه الحالى ، بالقرب من القطب الشمالى الجغرافى للأرض (شكل 8.17). ويمكن تفسير هذا الدليل من المغناطيسية القديمة بثلاث طرق: الأولى أن قارة أوروبا بقيت ثابتة فى مكانها وأن القطب المغناطيسى الشمالى هو الذى تحرك ، والثانية : أن القطب المغناطيسى الشمالى كان ثابتا وأن قارة أوروبا هى التى تحركت ، أما الطريقة الثالثة فتفترض أن كلا من قارة أوروبا والقطب الشمالى المغناطيسى قد تحركا .



شكل (8.17): المسارات الظاهرية للتجوال القطبى polar wandering لكل من أمريكا الشمالية وأوروبا ، كما يظهر الموضع الظاهرى للقطب الشمالى المغناطيسى فى مختلف العصور على المسار الظاهرى للتجوال القطبى لكل قارة .

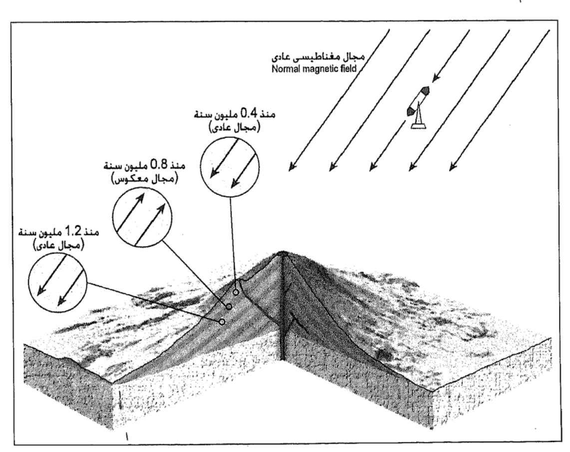
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

وعندما تم إسقاط قراءات المغناطيسية القديمة والتى قيست من طفوح لابة عديدة مختلفة الأعمار فى شمال أمريكا على خريطة ، أشارت تلك القراءات إلى مواقع مختلفة للقطب المغناطيسى الشمالى ، تختلف عن تلك التى سجلتها طفوح من العمر نفسه فى أوروبا (شكل 8.17). وعلاوة على ذلك فقد أشارت تحاليل طفوح اللابة من كل القارات إلى أن كل قارة لها سلسلة خاصة من الأقطاب المغناطيسية . هل يعنى ذلك أن كل قارة لها قطب شمالى مختلف؟ يصعب قبول هذا التفسير

فى ظل قوانين الفيزياء التى نعرفها عن كيفية نشأة المجال المغناطيسى للأرض .

ولذلك فإن التفسير الأفضل لتجوال الأقطاب المغناطيسية polar wandering ظاهريا هو أنها بقيت فى مواقعها الحالية بالقرب من الأقطاب الجغرافية ، وأن القارات هى التى تحركت . وعندما يتم تجميع القارات فى كتلة واحدة ومطابقة القارات مع بعضها بحيث أن التسجيلات المغناطيسية القديمة تشير إلى قطب شمالى واحد ، فإننا نجد كما فعل فاجنر ، أن تتابعات الصخور وسلاسل الجبال والرواسب الجليدية تتماثل وتتناظر ، وأن الدليل الحفرى والمناخى يكون متفقا مع الجغرافية القديمة التى تم إعادة بنائها .

الانعكاسات المغناطيسية: تجمعت أدلة عديدة منذ أوائل الخمسينات من القرن العشرين لتثبت أن المجال المغناطيسى للأرض قد عكس قطبيته ، أى اتجاهه ، دوريا فى الماضى . ويعرف مثل هذا التغير فى الاستقطاب من الاتجاه العادى إلى الاتجاه المعكوس بالانعكاس المغناطيسى **magnetic reversal** . وفى أثناء زمن القطبية العادية تترك الخطوط المغناطيسية الأرض بالقرب من القطب الجنوبى الجغرافى ، ثم تدخل إليها مرة أخرى بالقرب من القطب الشمالى الجغرافى (شكل 7.17) . ويعرف هذا الاتجاه بالقطبية العادية ، حيث إنه يماثل اتجاه القطبية الحالية . بينما تتحرك خطوط المغناطيسية فى اتجاه عكسى أثناء القطبية



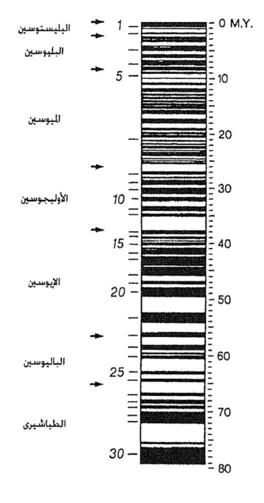
شكل (9.17): شكل توضيحى للمغناطيسية القديمة paleomagnetism المحفوظة فى تدفقات من اللابة من أعمار مختلفة ، وقد استخدمت المعلومات التى أمكن الحصول عليها من مناطق مختلفة من أنحاء العالم لعمل مقياس زمنى time scale للمغناطيسية العادية normal والمعكوسة reversed والموضحة على شكل (10.17).

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

المعكوسة reversed polarity ، حيث تترك الأرض بالقرب من القطب الشمالى ، ثم تدخلها مرة أخرى بالقرب من القطب الجنوبى (شكل 7.17) . وبمعنى آخر ، فإن القطبين المغناطيسيين الشمالى والجنوبى يتبادلان مواقعهما أثناء الانعكاس المغناطيسى . وكما سبق أن ذكرنا ، فإن عديدًا من الصخور يحتوى على سجل لشدة واتجاه المجال المغناطيسى للأرض أثناء تكون الصخور .

وتأتى معظم الأدلة على الانعكاسات المغناطيسية من طفوح اللابة على القارات . وتظهر دراسة المغناطيسية القديمة فى تتابع من طفوح اللابة ، أن اتجاه المجال المغناطيسى بها كان عكس اتجاه المجال المغناطيسى الحالى للأرض (شكل 9.17) . ويعنى ذلك، أن الأقطاب المغناطيسية للأرض قد عكست مواقعها ، أثناء الزمن الذى بردت فيه اللابة ، بمعنى أن إبرة البوصلة كانت تشير ناحية الجنوب بدلا من الشمال. ويوجد عديد من فترات المغناطيسية العادية والمعكوسة مسجلاً فى طفوح اللابة ، وهى أحداث تُسجّل على مستوى العالم . وحيث إنه يمكن تحديد عمر طفوح اللابة باستخدام النظائر المشعة ، فإنه يمكن تحديد عمر هذه الانعكاسات . ويوضح (شكل 10.17) زمن المغناطيسية العادية والمعكوسة خلال 80 مليون سنة الماضية . ويرجح عديد من الدراسات أن المجال المغناطيسى للأرض ينعكس كل نصف مليون سنة تقريبا .

ولكن ما سبب الانعكاسات المغناطيسية؟ . بالطبع فإن الإجابة عن هذا السؤال ليست سهلة ، حيث إنه لا يُعرف كيف نشأ المجال المغناطيسى للأرض . وتعضد الدراسات الحديثة فرضية أن المجال المغناطيسى للأرض قد نشأ من تيارات حمل فى اللب الخارجى السائل للأرض ، وربما يحدث الانعكاس فى المجال المغناطيسى حينما تغير تيارات الحمل اتجاهها . بينما يعتقد بعض الجيولوجيين أن الانعكاسات ربما تحدث نتيجة اصطدام كويكب أو مذنب بالأرض . ولهذا لا يوجد اتفاق حتى الآن بين الجيولوجيين على سبب هذه الانعكاسات المغناطيسية .



شكل (10.17): مقياس الزمن المغناطيسى للأرض geomagnetic time scale خلال الثمانين مليون سنة الأخيرة ، ويظهر زمن القطبية المغناطيسية العادية باللون الأسود ، بينما تظهر المغناطيسية المعكوسة باللون الأبيض .

(After Heirtzler, J.R., *et al.*, 1968: Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals and motions of the ocean floor and continents. Jour. Geophys. Res., V. 73).

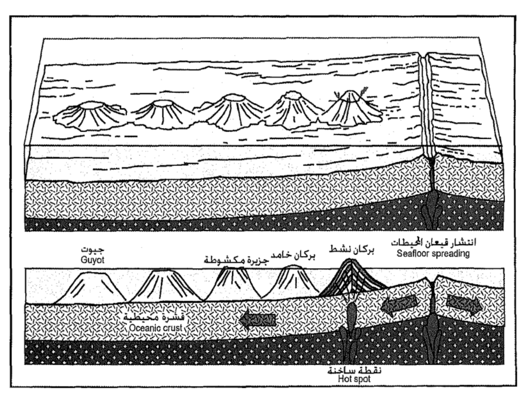
IV. انتشار قيعان المحيطات

بالإضافة إلى أبحاث المغناطيسية القديمة فى خمسينات القرن العشرين ، فقد أدى الاهتمام ببحوث علوم البحار إلى عمل خرائط شاملة لأحواض

المحيطات فى العالم. وقد أظهرت تلك الخرائط أن قيعان المحيطات تحتوى على أهم المرتفعات الجبلية على الأرض، والتى تعرف بحيود وسط المحيط، وأن حيود وسط الأطلنطى Mid-Atlantic Ridge هى جزء من نظام للحيود منتشر على مستوى الكرة الأرضية ككل، حيث يبلغ طوله أكثر من 65000 كم. ويتراوح عرض حيود وسط المحيط بين 500 كم و 5000 كم، حيث تشغل نصف مساحة قاع المحيط فى بعض الأماكن. وتختلف حيود قاع المحيط عن الجبال فوق القارات، والتى تتكون من تتابع من الصخور الرسوبية المتحولة والمقطوعة بصدوع، بينما تتكون الحيود المحيطية من تتابع من طبقات البازلت التى تم رفعها وقطعها بالصدوع. كما ثبت أيضا أن الحيود المحيطية تتميز بسريان حرارى heat flow عال ونشاط زلزالى ونشاط بركانى بازلتى، يقع على امتداد منطقة ضيقة توجد مركزيا عند قمة تلك الحيود وتعرف بنطاقات الخسف rift zones. كما توجد الانعكاسات المغناطيسية وكذلك عمر الرواسب البحرية العميقة الموجودة فوق القشرة المحيطية مباشرة فى نمط مميز بالنسبة للحيود المحيطية.

وقد كشف هارى هيس Harry Hess بحوثه فى المحيط الهادى أثناء خدمته فى الحرب العالمية الثانية، حيث اكتشف الجيوتات guyots (جزر بركانية مسطحة القمة مغمورة تحت سطح البحر) والتى أمدت الجيولوجيين بدليل آخر على حركة قاع المحيط بعيداً عن حيود وسط المحيط (شكل 11.17).

وقد نشر هيس اكتشافه للجيوت ونتائج دراساته الأخرى فى بحث مهم عام 1962 م اقترح فيه فرضية انتشار قيعان المحيطات **seafloor spreading** كما



شكل (**11.17**): سلسلة من الجزر البركانية تكونت عندما تحركت قشرة محيطية فوق نقطة ساخنة.

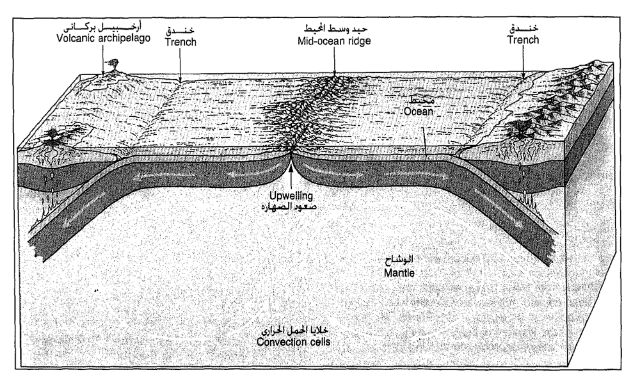
(After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

شرح فيه أيضا التحرك القارى . وقد اقترح هيس أن القارات لا تتحرك عبر القشرة المحيطية أو خلالها ، بل إن كلا من القارات والقشرة المحيطية يتحركان سويا وأنهما جزء من ألواح كبيرة . وطبقاً لفرضية هيس ، فإن القشرة المحيطية تنفصل عند حيود وسط المحيط حيث تتكون قشرة محيطية جديدة من الصهارة الصاعدة . وعندما تبرد الصهارة ، فإن القشرة المحيطية المتكونة حديثاً تتحرك جانبيا بعيداً عن الحيود . وهكذا يمكن شرح كيف أن الجزر البركانية المتكونة عند قمم الحيود أو بالقرب منها أصبحت فيما بعد جيوتات (شكل 11.17).

وقد أحيا هيس الفكرة التى اقترحها أرثر هولمز وآخرون فى الفترة1930 - 1940 م عن نظام نقل الحرارة أو خلايا الحمل الحرارى cells thermal convection خلال الوشاح، كميكانيكية تفسر تحرك الألواح . وتبعا لما ذكره هيس، فإن الصهارة الساخنة تصعد من الوشاح وتتداخل على امتداد الكسور فى نطاق الخسف rift zone حيث يتم تحديد الحيود المحيطية وتكون قشرة محيطية جديدة ، ثم تندس القشرة المحيطية الباردة فى الوشاح عند الخنادق المحيطية العميقة حيث تسخن وتصعد مرة أخرى (شكل 12.17) . وتحمل خلايا الحمل الحرارى فى الوشاح قاع المحيط إلى الخنادق المحيطية العميقة حيث يغوص قاع المحيط فى الوشاح ، بشكل مشابه لأحزمة نقل البضائع .

أ. الانعكاسات المغناطيسية والانجراف القارى

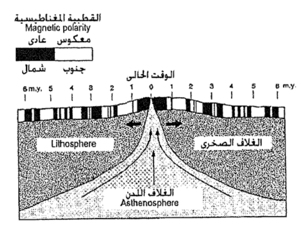
كيف يمكن إثبات فرضية هيس؟ . فإذا كانت هناك قشرة محيطية جديدة تتكون عند الحيود المحيطية



شكل (12.17): انتشار قيعان المحيطات sea-floor spreading . تؤدى مادة الوشاح الصاعدة على امتداد حيود وسط المحيط mid-ocean ridge إلى نشأة قشرة محيطية جديدة . وتحمل خلايا الحمل الحرارى فى الوشاح قاع المحيط بشكل مشابه لأحزمة نقل البضائع إلى الخنادق المحيطية العميقة ، حيث يغوص قاع المحيط فى الوشاح .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

باستمرار، وأن المجال المغناطيسى يعكس نفسه دوريا، فإن تلك الانعكاسات المغناطيسية ستسجل فى صخور القشرة المحيطية كشاذات مغناطيسية. وقد أشارت النتائج المغناطيسية التى جمعها العلماء إلى وجود نمط غير عادى من شاذات مغناطيسية موجبة وسالبة على قاع المحيط الهادئ من ناحية الشاطئ الغربى لأمريكا الشمالية. وقد تكوّن هذا النمط من مجموعات من الشرائط فى اتجاه شمال – جنوب تقريباً، إلا أنها كانت مقطوعة ومزاحة بكسور أساسية تمتد فى اتجاه شرق غرب. وقد فُسر ذلك النمط عام 1963 م عندما توصل الجيولوجيان البريطانيان فاين وماثيوس Vine and D. Matthews من جامعة كمبردج ومورلى W.Morley وهو جيولوجى كندى، مستقلين عن بعضهم، إلى نموذج لشرح هذا النمط من الشاذات المغناطيسية.



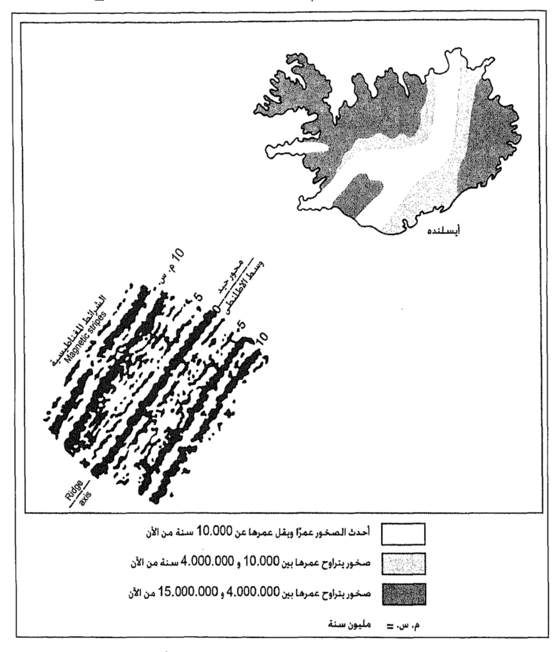
شكل 13.17): قطاع عرضى لقاع محيط موضحا عليه الشاذات المغناطيسية. وتوضح الأرقام الموجودة فوق قاع المحيط الأعمار مقدرة بملايين السنين. ويشبه التماثل على جانبى حيد وسط المحيط شريطا يسجل حركة حزامى نقل بضائع يبتعدان عن حيد وسط المحيط.
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston.

وقد اقترح هؤلاء العلماء الثلاثة أنه عندما تنبثق الصهارة البازلتية على قمم الحيود المحيطية، فإنها تسجل القطبية المغناطيسية للأرض magnetic polarity فى وقت تبردها. ونتيجة لتحرك قاع المحيط بعيداً عن الحيود المحيطية، فإن تداخلات الصهارة المتكررة سوف تكوّن مجموعات متماثلة من الشرائط المغناطيسية، حيث تُسجل أوقات القطبية المغناطيسية العادية والمعكوسة (شكل 13.17). وقد تأيد ذلك بعد بوقت قصير فاين وماثيوس ومورلى بدليل من نتائج المغناطيسية التى قيست عبر حيود ريكينز Reykjanes Ridge، وهو جزء من حيود وسط الأطلنطى جنوب غرب جزيرة أيسلندة (شكل 14.17)، حيث وجد العلماء أن الشاذات المغناطيسية فى هذه المنطقة تكون شرائط موزعة موازية لبعضها البعض ومتماثلة على جانبى الحيود المحيطى. وفى نهاية ستينيات القرن العشرين وجدت أنماط من الشاذات المغناطيسية محيطة بمعظم الحيود المحيطية.

وقد تم المسح المغناطيسى لمعظم قيعان المحيطات تقريبا، حيث توضح نتائج ذلك المسح أن أحدث جزء من القشرة المحيطية يكون مجاوراً لحيود الانتشار، وأن عمر القشرة المحيطية يزداد كلما ابتعدنا عن محور الحيود المحيطى، كما هو متوقع من فرضية انتشار قيعان المحيطات. وعلاوة على ذلك، فإن عمر أقدم الصخور المحيطية هو 180 مليون سنة، بينما يبلغ عمر أقدم صخور القشرة القارية المنكشفة حوالى 3.96 بليون سنة. ويؤدى هذا الفرق إلى تأييد فكرة أن أحواض المحيطات هى ملامح حديثة جيولوجيا، وأن فتح تلك المحيطات وغلقها مسئول عن حركة القارات.

ب – الحفر البحرى العميق: إثبات لفرضية انتشار قيعان المحيطات

أكدت النتائج التى تم الحصول عليها من مشروع الحفر البحرى العميق Deep-Sea Drilling Project التفسيرات التى سبق التوصل إليها من دراسات المغناطيسية القديمة. وقد قدمت أسطوانات الحفر من الرواسب البحرية العميقة وكذلك القطاعات الجانبية (بروفيل) الزلزالية التى تم الحصول عليها

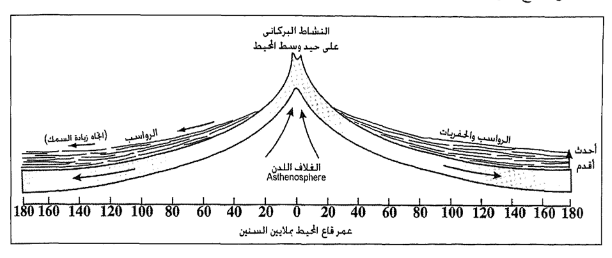


شكل (**14.17**): شدة المجال المغناطيسى مقاسة عند سطح المحيط الأطلنطى جنوب غرب جزيرة أيسلندة ، ويظهر فيها نسق مكون من شرائط متوازية وموازية لمحور حيد وسط المحيط الأطلنطى . ويعد تماثل النسق وتماثل عمر الصخور البركانية على جانبى الحيد دلائل قوية على انتشار قاع المحيط بعيدا عن محور الحيد المحيطى .

(After Drake, C., 1970: "The geological revolution", Condon Lectures, Oregon State System of Higher Education, Eugene).

بواسطة سفينة البحوث جلومار تشالنجر Glomar Challenger وسفن البحوث الأخرى العديد من النتائج التى تؤيد فرضية انتشار قيعان المحيطات.

فطبقاً لتلك الفرضية ، فإن القشرة المحيطية تتكون باستمرار عند حيود وسط المحيط وتتحرك بعيداً عن تلك الحيود بسبب انتشار قيعان المحيطات حيث تستهلك عند نطاقات الاندساس subduction zones . فإذا كان الأمر كذلك ، فإن القشرة المحيطية يجب أن تكون أحدث عمرًا عند الحيود وتصبح أقدم عمرا كلما بعدنا عن تلك الحيود . وعلاوة على ذلك ،



شكل (15.17): قطاع عرضى فى غلاف صخرى محيطى عمودى على حيود وسط المحيط ، ويلاحظ أنه كلما ابتعدنا عن الحيود:

1) زادت أعمار الغلاف الصخرى المقاسة بالطرق الإشعاعية .
2) زاد سمك الرواسب المتراكمة .
3) زاد عمر الحفريات فى الرواسب .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

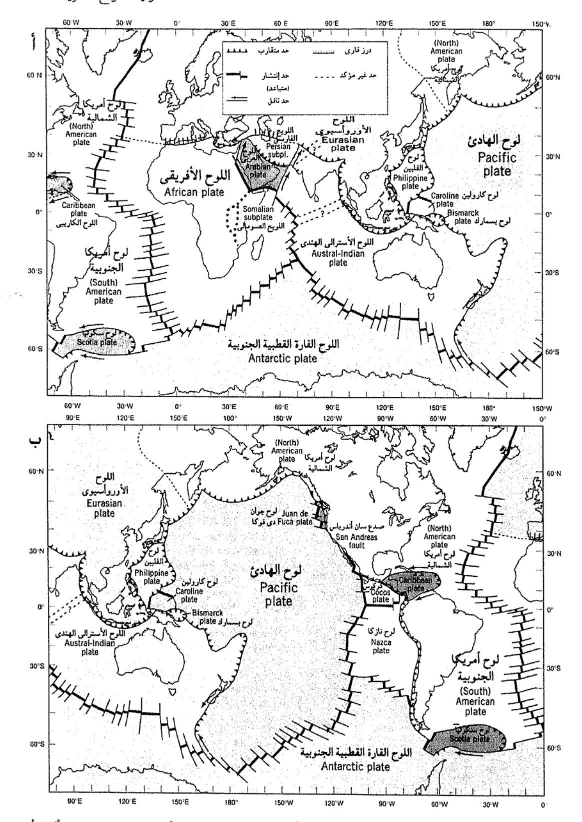
فإن صخور القشرة المحيطية على جانبى الحيود تكون متماثلة فى العمر . وتؤيد نتائج المغناطيسية القديمة هذه الاستنتاجات (شكل 13.17) . وبالإضافة إلى ذلك ، فإن الرواسب الموجودة فوق القشرة المحيطية تحتوى على حفريات تؤكد هذا التوزيع المتوقع للأعمار (شكل 15.17) ، كما تؤكده أيضا نتائج التأريخ بالطرق الإشعاعية لصخور الجزر المحيطية.

وتتراكم الرواسب فى المحيطات المفتوحة بمعدل لا يقل عن 3مم فى المتوسط كل 1000 سنة . فإذا كانت أحواض المحيطات قديمة قدم القارات ، فإننا نتوقع أن يصل سمك الرواسب البحرية العميقة لعدة كيلومترات . ومع ذلك ، فإن النتائج التى حصلنا عليها من آبار الحفر المتعددة تشير إلى أن سمك الرواسب البحرية العميقة لا يزيد عن عدد من مئات الأمتار وتقل أو تختفى عند الحيود المحيطية. ولا يمثل اختفاء تلك الرواسب عند الحيود المحيطية أى مفاجأة ؛ لأن تلك المناطق هى التى تتكون فيها قشرة محيطية جديدة باستمرار نتيجة النشاط البركانى وانتشار قيعان المحيطات . وبالتالى لا تجد الرواسب غير وقت قليل لكى تتراكم عند حيود الانتشار أو بالقرب منها حيث تكون القشرة المحيطية حديثة ، إلا أن السمك يزداد كلما بعدنا عن الحيود (شكل 15.17) .

V. نظرية تكتونية الألواح

تقوم نظرية تكتونية الألواح **plate tectonic theory** على نموذج بسيط للأرض يفترض أن الغلاف الصخرى الصلب للأرض ، والذى يشمل كلا من القشرتين المحيطية والقارية بالإضافة إلى الجزء العلوى للوشاح والموجود أسفل القشرة الأرضية ، يتكون من عدد من القطع الصخرية المختلفة الحجم ، والتى تسمى **ألواحاً plates** .

وتتكون ألواح الغلاف الصخرى من سبعة ألواح كبيرة ، موضحه فى جدول (1.17) . كما أمكن تمييز تسعة من الألواح الأصغر حجما واللويحات والتى تتراوح فى الحجم من متوسطة إلى صغيرة نسبياً . ويبين (شكل 16.17) تلك الألواح وحدودها .



شكل (16.17): ألواح القشرة الأرضية فى الوقت الحاضر . تتحرك ألواح الغلاف الصخرى ببطء أفقيا بعيدا عن بعضها نحو ألواح أخرى ، فتنفصل الألواح على امتداد حيود وسط المحيط mid-ocean ridges ، وتتقارب عند نطاقات الاندساس subduction zones وتتزلق بالنسبة لبعضها البعض على امتداد صدوع مضربية الانزلاق strike-slip faults .

(After Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

جدول (1.17) ألواح الغلاف الصخرى

الألواح الكبيرة		الألواح الأصغر حجما		اللويحات	
الهادئ	Pacific	نازكا	Nazca	الفارسى	Persian
الأمريكى الشمالى	North American	كوكوس	Cocos	الصومالى	Somalian
الأمريكى الجنوبى	South American	الفلبين	Philippine		
الأوروآسيوى	Eurasian	الكاريبى	Caribbean		
الأفريقى	African	العربى	Arabian		
الاسترالى – الهندى	Australian- Indian	جوان دى فوكا	Juan de Fuca		
القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا)	Antarctica	كارولين	Caroline		
		بسمارك	Bismark		
		سكوتيا	Scotia		

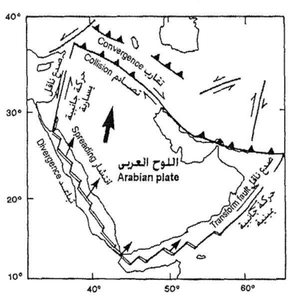
ويشغل لوح المحيط الهادئ الكبير معظم المحيط الهادئ ويتكون كله تقريباً من غلاف صخرى محيطى باستثناء جزء صغير من غلاف صخرى قارى يشمل جنوب غرب كاليفورنيا وشبه جزيرة باها بكاليفورنيا. ويتحرك لوح المحيط الهادئ فى اتجاه الشمال غرب . ولذلك ، يحد هذا اللوح نطاقات اندساس على امتداد معظم حدوده الغربية والشمالية ، بينما تكون معظم حدوده الشرقية والجنوبية حدود انتشار. ونلاحظ من شكل (16.17) أن باقى الألواح الكبيرة تشمل جزءا من قشرة محيطية وجزءا من قشرة قارية.

ويشمل اللوحان الأمريكى الشمالى والأمريكى الجنوبى معظم الغلاف الصخرى القارى لأمريكا الشمالية والجنوبية بالإضافة إلى الغلاف الصخرى المحيطى الواقع غرب حيد وسط الأطلنطى . ومعظم الحد الغربى للوحين الأمريكيين الشمالى والجنوبى هو حد اندساس حيث تهبط القشرة المحيطية تحت الغلاف الصخرى القارى ، بينما يكون الحد الشرقى لهذين اللوحين هو حد انتشار . ويشغل الغلاف الصخرى القارى معظم اللوح الأوروأسيوى ، بينما يحد الحافة الغربية والشمالية حزام من غلاف صخرى محيطى. ويوجد فى وسط اللوح الأفريقى غلاف صخرى قارى ، يكوّن قارة أفريقيا ، يحيط به تقريباً غلاف صخرى محيطى.

ويأخذ اللوح الاسترالى – الهندى شكل مستطيل طويل ، ويكون معظمه عبارة عن غلاف صخرى محيطى يضم لبين من الغلاف الصخرى القارى ، هما : قارة أستراليا وشبه القارة الهندية . وتدل بعض الدراسات الحديثة أن تلك القارتين تتحركان مستقلتين عن بعضهما، ويمكن اعتبارهما فعليا أجزاء من ألواح مستقلة. ويأخذ لوح القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) شكلاً بيضاويا تقريباً حيث تكون معظم حوافه عبارة عن حدود انتشار، مما يعنى أن الألواح الأخرى تتحرك بعيداً عن القطب الجنوبى. وتكون قارة القطب الجنوبى (أنتاركتيكا) لبا من غلاف صخرى قارى ، يحيط به تماماً غلاف صخرى محيطى.

ويوضح شكل (17.17) حدود اللوح العربى الذى يتكون كلية من غلاف صخرى قارى. وعلى الرغم من أن البحر الأحمر وخليج عدن لا يحدث عليهما زلازل كبيرة ، إلا أن وجودهما (كنواة لمحيطات فى المستقبل) هو المسئول عن دفع اللوح العربى إلى اللوح الأورآسيوى ، مما تسبب فى نشأة عديد من الزلازل المدمرة هناك . وقد أدى هذا التصادم إلى نشأة جبال زاجروس وطوروس ، وتكوّن عديد من الصدوع وحدوث زلازل مدمرة مميزة لهذا الجزء من العالم .

كما يختلف سمك الألواح ، حيث يصل سمك الألواح المتكونة من الوشاح العلوى الصلب والقشرة القارية إلى حوالي200 كم ، بينما يصل سمك الألواح المتكونة من الوشاح العلوى الصلب والقشرة المحيطية إلى حوالى 100 كم .



شكل (17.17): اللوح العربى والذى يتكون كلية من غلاف صخرى قارى . وقد أدى تصادم اللوح العربى باللوح الأوروآسيوى إلى نشأة جبال زاجروس وجبال القوقاز.

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ويوجد الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) أسفل الغلاف الصخرى ، والذى يكون أكثر سخونة وضعفا . ويعتقد أن حركة الألواح التى تعلو الغلاف اللدن تنشأ بسبب وجود نظام انتقال حرارى يشمل تيارًا صاعدًا للمواد الساخنة والتيار المستعرض وتيارًا هابطًا للمواد الباردة . وعندما تتحرك الألواح فوق الغلاف اللدن ، فإنها تنفصل غالبا عند الحيود المحيطية ، بينما تصطدم وتندس فى مناطق أخرى مثل الخنادق المحيطية، حيث تعود مرة أخرى إلى الوشاح شكل (12.17).

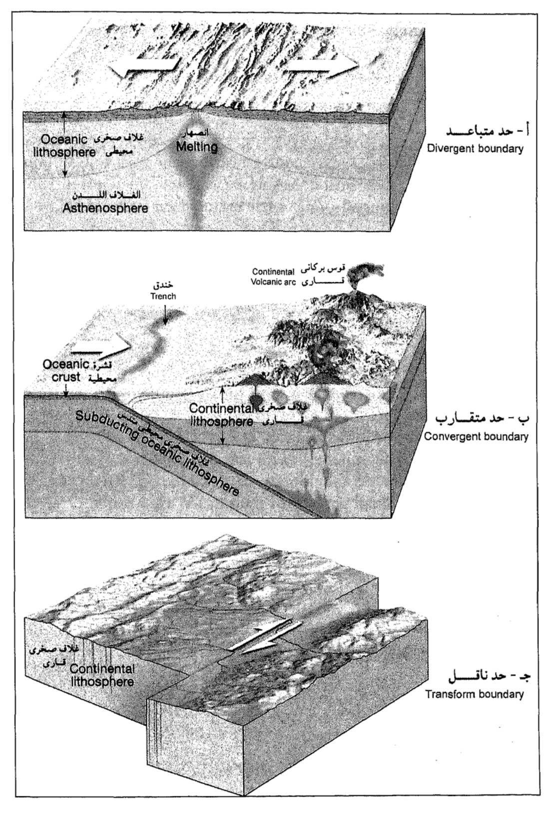
وتلقى نظرية تكتونية الألواح حاليا قبولا واسعا من معظم الجيولوجيين ، بسبب الأدلة المتعددة التى تعتمد عليها ، كما أنها نظرية شاملة تفسر عديدًا من الملامح والأحداث الجيولوجية والتى يبدو أنها غير مرتبطة ظاهريا . ويفسر الجيولوجيون الآن عديدًا من العمليات الجيولوجية ، مثل بناء الجبال والنشاط الزلزالى والنشاط البركانى فى ضوء نظرية تكتونية الألواح.

أ. حدود الألواح

تتحرك الألواح بالنسبة لبعضها البعض ، بحيث يمكن التمييز بين ثلاثة أنواع من حدود الألواح وهى الحدود المتباعدة والمتقاربة والناقلة (شكل 18.17) . ويسبب تفاعل الألواح مع بعضها عند حدودها معظم النشاط الزلزالى والنشاط البركانى على الأرض وكذلك عمليات بناء الجبال (جدول 2.17) .

1- الحدود المتباعدة

توجد حدود الألواح المتباعدة **divergent plate boundaries** ، والتى تعرف أيضاً بمراكز الانتشار **spreading centers** ، عندما تنفصل الألواح عن بعضها ويتكون غلاف صخرى محيطى جديد ، على امتداد محور حيود وسط المحيط mid-oceanic ridges. وتتميز الحيود المحيطية بطوبوغرافية وعرة



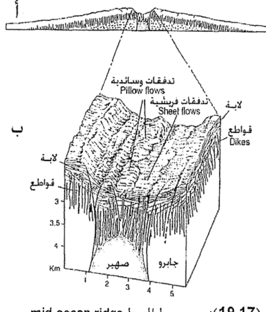
شكل (18.17): حدود الألواح المختلفة

أ. حد متباعد. ب. حد متقارب. ج. حد ناقل.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

متجعدة وتضاريس مرتفعة على امتداد كسور كبيرة (صدوع عادية) مع هبوط قاع الوادى الممتد على قمة الحيود ونشاط زلزالى وسريان حرارى heat flow عالٍ وانسيابات بازلتية أو لابة وسائدية . ويوضح شكل (19.17) قطاعا مستعرضا لحيود وسط المحيط ، مع تكبير يوضح تلك التجمعات الصخرية الممتدة مركزيا عند قمة تلك الحيود . وجدير بالملاحظة أن انبثاق اللابة وتدفقها من قمة الحيود المحيطية ، وعلى امتداد مراكز الانتشار لا يكون مستمرا ، وإنما يتدفق بشكل متقطع مع تغير موقع المحور البركانى مع مضى الزمن . ويؤدى انبثاق اللابة إلى تكون قشرة محيطية ، كما تؤدى الانبثاقات المتتابعة إلى تكون حيود وسط المحيط.

وتعتمد دراسة قيعان المحيطات على المعلومات التى تم جمعها من الحفر فى المحيطات ومن جانبية (بروفيل) الموجات الصوتية ، بالإضافة إلى دراسة الأوفيوليتات ، وهى تجمعات من صخور مميزة لقيعان المحيطات موجودة فوق اليابسة حاليا ، وانتقلت نتيجة انتشار قيعان المحيطات ، ثم صعودها فوق مستوى سطح البحر ودفعها فوق القارات أثناء مرحلة من تصادم الألواح . وتتكون تلك التجمعات والمعروفة بالمجموعات الأوفيوليتية **ophiolite suites** من رواسب الماء العميق ولابات بازلتية بحرية وتداخلات نارية مافية (صخور الجابرو) (شكل 20.17).

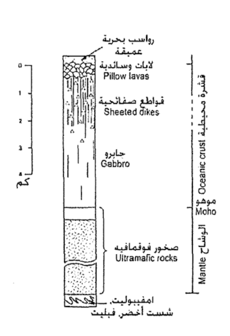


شكل (**19.17**): حيود وسط المحيط mid-ocean ridge

أ) قطاع مستعرض لحيود وسط المحيط

ب) تكبير يوضح تفاصيل وادى خسف rift valley عند قمة حيود وسط المحيط . والتى تتميز بطوبوغرافية وعرة متجعدة وتضاريس مرتفعة ، مع هبوط قاع الوادى الممتد على قمة الحيود وانسيابات بازلتية وتدفقات من اللابة الوسائدية .

(After Hekinian, Moore and Bryan, 1976; Ballard and van Andel, 1977; Ballard, van Andel and Holcomb, 1982, In: Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm.C. Brown Publishers).



شكل (**20.17**): قطاع نموذجى لتتابع أوفيوليت ophiolite . ويدل تجمع الرواسب البحرية العميقة واللابات الوسائدية والقواطع الصفائحية البازلتية ومتداخلات صخور الجابرو على نشأة هذا التتابع فى بحر عميق . والأوفيوليتات هى قطع من القشرة المحيطية دفعت إلى حافة قارة نتيجة تصادم الألواح .

(After Moores and Vine, 1971; Vine and Moores, 1972; Hopsom, *et al.*, 1981, In: Raymond, L.A., 1995: Petrology: The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic rocks. Wm.C. Brown Publishers).

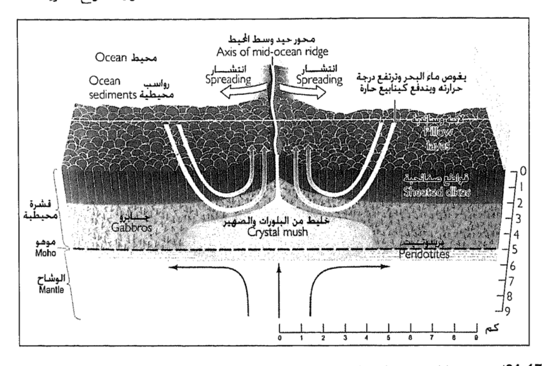
جدول **17 – 2**: الأنواع المختلفة لحدود الألواح والخصائص المميزة لكل منها

نوع القشرة على كل لوح	الخصائص	نوع الحد		
		متباعد Divergent	متقارب Convergent	حد ناقل Transform fault
محيطى – محيطى	الطوبوغرافية	حيد محيطى مع وادى خسف مركزى	خندق محيطى	تتكون الحيود والأودية من القشرة المحيطية
	الزلازل	كل البؤر تقع على عمق أقل من 100 كم	يتراوح عمق البؤر بين 0 و 700 كم	عمق البؤر حوالى 100 كم
	النشاط البركانى	حمم وسائدية بازلتية	تتكون البراكين الأنديزيتية فى أقواس جزر موازية للخنادق	تندر البراكين
	مثال	حيد وسط الأطلنطى	خندق تونجا- كرماديك وخندق الأليوشن	كسر كين Kane Fracture
محيطى – قارى	الطوبوغرافية	------	خندق محيطى	------
	الزلازل	------	بؤر الزلازل على عمق من 0 إلى 700 كم	------
	النشاط البركانى	------	البراكين الأنديزيتية مع القليل من الداسيت والريوليت فى أحزمة جبال موازية للخندق	------
	مثال	لا توجد أمثلة	الشاطئ الغربى لأمريكا الجنوبية	لا توجد أمثلة
قارى – قارى	الطوبوغرافية	وادى خسف	حزام جبال حديث	نطاق صدع يسبب إزاحة مظاهر سطح الأرض
	الزلازل	كل بؤر الزلازل على عمق أقل من 100 كم	البؤر على عمق حوالى 300 كم وتنتشر على منطقة واسعة	البؤر الزلزالية على عمق حوالى 100 كم وتنتشر على منطقة واسعة
	النشاط البركانى	براكين من البازلت والريوليت	لا يوجد نشاط بركانى ، تحول شديد وتداخل من بلوتونات جرانيتية	لا يوجد نشاط بركانى
	مثال	وادى الخسف الأفريقى والبحر الأحمر	الهيمالايا والألب وزاجروس	صدع سان اندرياس – صدع البحر الميت

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

وتعتبر عملية نشأة قيعان المحيطات غير مفهومة تماما حتى الآن ، ولكن من المعروف أنها تشتمل على نشاط صهارى ودوران لماء البحر ونشاط تكتونى.

ويمثل شكل 21.17 صورة تخطيطية مبسطة جداً لما يحدث . وقد أظهرت جانبيات (بروفيلات) الموجات الصوتية عديدًا من غرف (أو عدسات) الصهارة

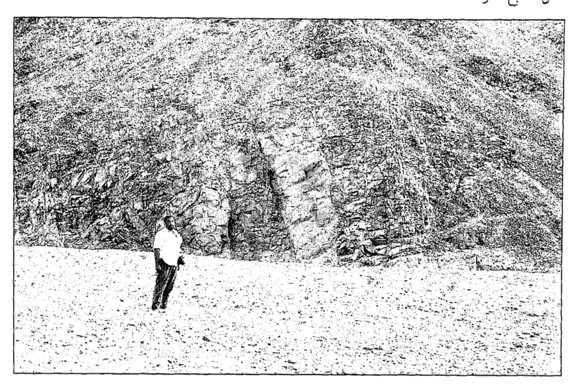


شكل (**21.17**): رسم مبسط لبيان كيف تتكون القشرة المحيطية عند حيود وسط المحيط . ويرتفع من الوشاح خليط من البلورات والصهير عند حيود وسط المحيط ، ويتجمع ليملأ غرفة صهارة **magma chamber** ضحلة رقيقة عدسية الشكل تندفع منها قواطع من الصهارة تكوّن لابة وسائدية عند قاع البحر ويسفلها قواطع صفائحية ، ويبرد خليط البلورات والصهير ويتكون الجابرو . كما يوضح الشكل طريقة نشأة المحاليل الحرمائية **hydrothermal solutions.**

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New

الصغيرة مثل تلك الموضحة فى شكل (21.17) . حيث يصعد الوشاح الساخن نتيجة انفصال الألواح ويبدأ فى الانصهار. وعندما تصل مادة الوشاح إلى أعماق ضحلة، فإنها تصبح مكونة من خليط من حوالى 85٪ بلورات و 15٪ من صهير بازلتى. ويملأ هذا الصهير غرفة صهارة ضحلة رقيقة عدسية الشكل ، يندفع منها فرش من القواطع . وتتداخل تلك القواطع المتكونة حديثا داخل قواطع سبق انبثاقها لتكون تركيب يتكون من مجموعة من القواطع الرأسية المتوازية تقريباً والمتراصة وتشبه مجموعة كتب متوازية موضوعة رأسياً. ويعرف هذا التركيب باسم **القواطع الصفائحية sheeted dykes** (شكل 22.17). ويتصلب البازلت المتدفق فوق سطح المحيط ليكون لابات وسائدية (شكل 4.5) ، وهى اللابات المميزة للنشاط البركانى تحت الماء. وتكون اللابات البازلتية غطاءً فوق القواطع الصفائحية . وعندما يتصلب الخليط الموجود فى غرف الصهارة فإنه يكوّن صخر الجابرو (المقابل الجوفى لصخور البازلت) الذى يكوّن طبقة أسفل القواطع الصفائحية . وتتكون طبقة رقيقة من الرواسب البحرية العميقة تغطى القشرة المحيطية المتكونة حديثاً.

وعندما ينتشر قاع المحيط ، فإن طبقات الرواسب واللابات والقواطع والجابرو تنقل بعيداً عن حيود وسط المحيط حيث يتجمع هذا التتابع المميز من الصخور ، والذى يكوّن القشرة المحيطية .



شكل (**22.17**): قواطع صفائحية sheeted dykes ، وادى غدير – الصحراء الشرقية – مصر
(أ.د. ممدوح عبد الغفور حسن ، هيئة المواد النووية – مصر) .

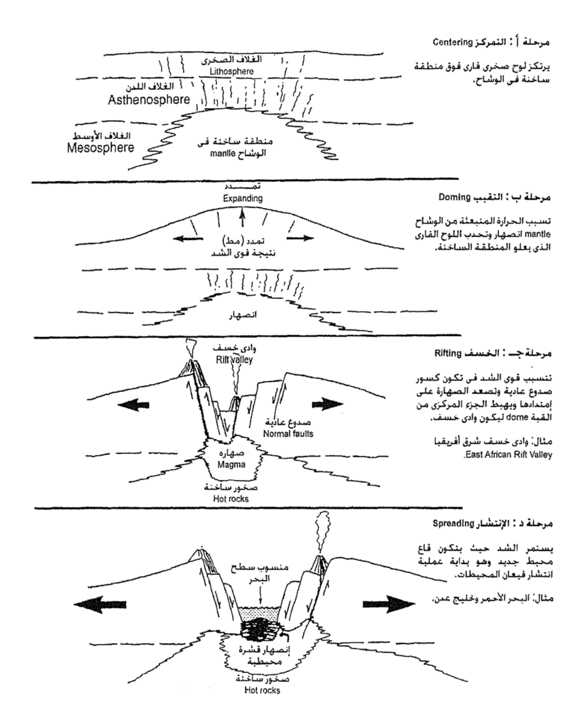
وتتواجد أيضاً الحدود المتباعدة تحت القارات خلال المراحل الأولى لتكسر القارات (شكل 23.17 أ ، ب) . وعندما تصعد الصهارة تحت قارة ، فإن القشرة الأرضية ترتفع أولا وتتمدد ويقل سمكها نتيجة التحدب ، حيث تتكون كسور ووديان خسف **rift valleys** (شكل 23.17 جـ). وخلال هذه المرحلة ، تتداخل الصهارة فى الصدوع والكسور لتكون جددا موازية sills وقواطع dikes وانسيابات من اللابة. وتغطى انسيابات اللابة فى معظم الأحيان قيعان وديان الخسف (23.17جـ) . وتقدم وديان خسف شرق أفريقيا مثالاً مميزا لهذه المرحلة من تكسر القارات .

وعندما تستمر عملية الانتشار ، فإن بعض وديان الخسف تستمر فى الاستطالة والتعمق حتى تكوّن بحرا ضيقا ، ممتدا طوليا ليفصل بين الكتلتين القارتين (شكل 23.17 د) . ويمثل البحر الأحمر ، الذى يفصل شبة الجزيرة العربية عن أفريقيا وكذلك خليج عدن جنوب الجزيرة العربية (شكل 12.18) وخليج كاليفورنيا الذى يفصل باها كاليفورنيا Baja California عن أرض المكسيك ، أمثلة جيدة لهذه المرحلة الأكثر تقدماً من عملية الخسف. وفى النهاية ، فإن نطاق الخسف يبقى مكانا لاستمرار النشاط النارى ، وتنشأ باستمرار قشرة محيطية جديدة لحوض محيطى مستمر فى التمدد .

2- الحدود المتقاربة

ليتكون غلاف صخرى جديد باستمرار على امتداد حدود الألواح المتباعدة ، فإن الغلاف الصخرى الأقدم يجب أن يستهلك ويعاد تدويره لكى تبقى المساحة الكلية لسطح الأرض ثابتة ، وإلا فإن الكرة الأرضية ستتمدد باستمرار. ويحدث هذا الاستهلاك للألواح عند حدود الألواح المتقاربة **convergent plate boundaries** حيث يقترب أو يتصادم لوحان.

وعندما يتصادم لوحان ، فإن الحافة المتقدمة لأحد اللوحين تهبط عند الحد المتقارب تحت حافة اللوح



شكل **(23.17)**: مراحل تكون حوض محيط نتيجة تكسر القارات .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

الآخـر نتيجـة عمليـة الاندسـاس **subduction**. وتتراوح زاوية الهبـوط بيـن 35° درجـة و 90° درجـة تقريباً من السطح وتتكون خنادق محيطية عميقة . ويحدد المستوى المائل للبؤر الزلزالية والمعروف بنطاق بينى أوف Benioff zone (شكل 15.16) نطاق الاندساس . وبينما يتحرك اللوح المندس إلى أسفل فى

الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، ترتفع درجة حرارته وينصهر في الوشاح في النهاية . وتعرف المنطقة المقوسة للنشاط الصهاري باسم **قوس صهاري magmatic arc** ، حيث يمتد هذا القوس موازيا للخندق المحيطي وتصعد الصهارة إلى السطح لتكون سلسلة من البراكين. فإذا تكونت البراكين على قشرة محيطية ، فإن القوس الصهاري يعرف في تلك الحالة بقوس جزر بركاني volcanic island arc. أما إذا تكونت على القشرة القارية ، فإن القوس الصهاري يسمى قوسًا بركانيًّا قاريًّا continental volcanic arc . ولا يحدث الاندساس عندما يكون كل من اللوحين المتقاربين قاريين ، بسبب أن كثافة القشرة الأرضية ليست عالية بدرجة كافية لتندس في الوشاح .

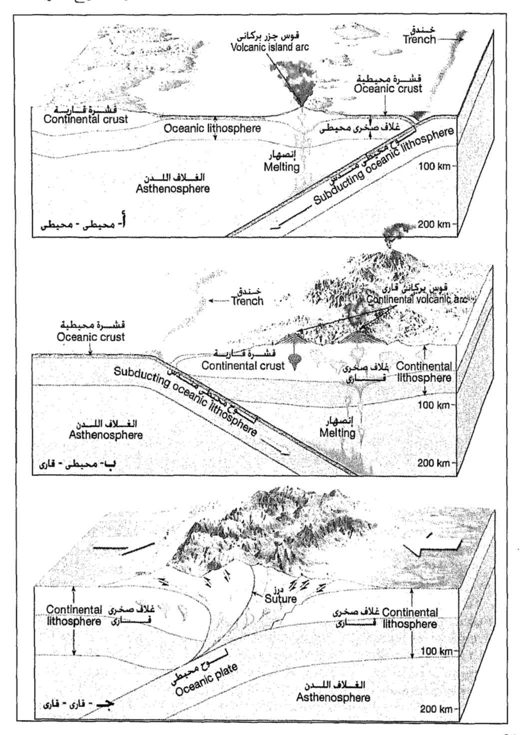
وتتميز حواف الألواح المتقاربة بالتشوه والنشاط البركاني وبناء الجبال والتحول والنشاط الزلزالي وتكون رواسب معدنية مهمة. ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من حدود الألواح المتقاربة وهي: محيطي – محيطي ، ومحيطي -قاري ، وقاري – قاري .

الحدود المحيطية – المحيطية: عندما يتقارب لوحان محيطيان ، يندس أحدهما تحت الآخر على امتداد **حد لوح محيطي – محيطي oceanic-oceanic plate boundary** (شكل 24.17أ)، ويهبط اللوح المندس لأسفل ليكون الجدار الخارجي للخندق المحيطي . ويتواجد على امتداد الجدار الداخلي للوح المندس أجزاء من رواسب بحرية وتدية الشكل مطوية ومتصدعة بدرجة كبيرة ، بالإضافة إلى غلاف صخري محيطي تم انتزاعه (كشطه) من اللوح الهابط . وعندما يهبط اللوح المندس في الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) فإنه يسخن وينصهر جزئيا .

وينصهر بعض البازلت ومعه الرواسب في اللوح ، حيث ينطلق الماء وبعض المواد الأخرى. ويؤثر الماء المنطلق في صخور البريدوتيت ، وهي المكون الرئيسي لوتد الوشاح الموجود فوق اللوح المندس وتحت اللوح العلوي الراكب، حيث يسبب انصهارها (شكل 25.17) . وقد أوضحت التجارب المعملية كما سبق أن ذكرنا، أن إضافة كميات صغيرة من الماء تتسبب في خفض درجة الحرارة التي تنصهر عندها صخور الوشاح بعديد من مئات الدرجات.

وتصعد مواد الوشاح الساخن الأقل كثافة وتستمر عملية الانصهار عندما ينخفض الضغط. ويكون الخليط الناتج من انصهار اللوح والصهير الناتج من الوشاح البريدوتيتي صهارة فوقمافية . ولقد تم التعرف في تلك الصهارة على عناصر شحيحة مميزة للقشرة المحيطية والرواسب ، مما يدل على مساهمة الصهير الناتج من انصهار اللوح الهابط في الصهارة .

وتتراكم معظم الصهارة الفوقمافية عند قاعدة قشرة اللوح الراكب، حيث يتداخل بعضها في القشرة. ويحدث التبلور التجزيئي fractional crystallization حينما تنفصل الصهارة أثناء تبردها إلى مكونات مختلفة ، بسبب التكون والعزل المتواليين للبلورات عند درجات حرارة متتابعة الانخفاض . كما قد تبتلع الصهارة بعض صخور القشرة وتهضمها خلال عملية التمثل assimilation process . وبهذه الطريقة فإن الصهارة الفوقمافية تكون صهارات ولابات مافية وأخرى أكثر سيليكية ، مثل البازلت والأنديزيت (ونادرا الداسيت). وتكون كثافة تلك الصهارة أقل من صخور الوشاح المحيطية وتصعد إلى سطح الأرض خلال اللوح العلوي الراكب overriding plate ، حيث تتكون سلسلة منحنية (مقوسة) من البراكين تسمى **قوس جزر بركاني volcanic island arc** (لاحظ أن أي مستوى يقطع جسم كروي يكون قوسا) . ويوازي هذا القوس



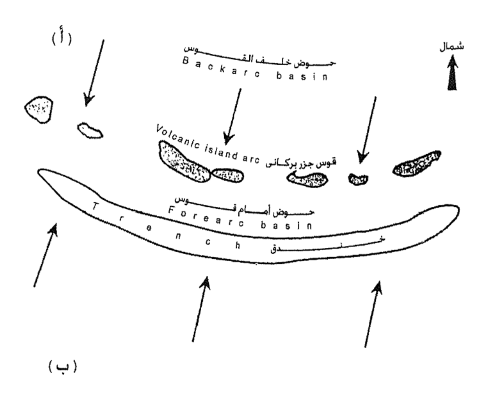
شكل (24.17): الحدود المتقاربة

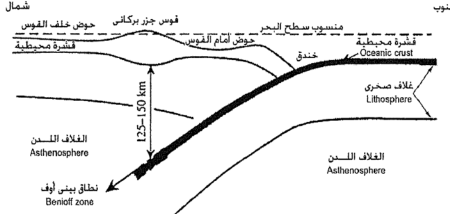
أ) محيطى – محيطى: عندما يتقارب لوحان محيطيان يندس أحدهما تحت الآخر ، ويهبط اللوح المندس فى الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ليسخن وينصهر جزئيا ، وتصعد الصهارة إلى سطح الأرض خلال اللوح العلوى الراكب لتكوّن سلسلة منحنية من البراكين تسمى قوس جزر بركانى.

ب) محيطى – قارى: عندما يتقارب لوحان أحدهما محيطى والآخر قارى يهبط اللوح المحيطى الأكثر كثافة ويندس تحت اللوح القارى فى الغلاف اللدن ليسخن وتتكون صهارة تصعد على هيئة سلسلة من البراكين تكون قوسًا بركانيًا قاريًّا أو تتداخل الصهارة فى الأعماق على هيئة بلوتونات .

جـ) قارى – قارى: عندما يتقارب لوحان قاريان لايندس أحدهما تحت الآخر ولكن يحدث تصادم ، ويتكون نطاق عريض ، يتميز بالتشوه الشديد عند حد التصادم .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).





شكل (**25.17**): أقواس الجزر البركانية **volcanic island arcs**

أ. خريطة توضح قوس جزر بركانية ، وتشير الأسهم إلى اتجاه تقارب اللوحين

ب. قطاع عرضى فى قوس جزر يمتد من الشمال إلى الجنوب ، يوضح الحوض أمام القوس **forearc basin** والحوض خلف القوس **backarc basin**.

تقريبا الخندق المحيطى ويكون مفصولا عنه بمسافة قد تصل إلى عدة مئات من الكيلومترات ، حيث تعتمد تلك المسافة على زاوية ميل اللوح الهابط . وتوجد منطقة بين قوس الجزر والخندق المحيطى تسمى أمام القوس (شكل 25.17) ، وتشمل تلك المنطقة **حوض أمام القوس forearc basin** ، وهو نطاق منخفض ممتلئ بالرواسب المستمدة من القوس البركانى ، بالإضافة إلى وتد متزايد accretionary wedge من الرواسب المحيطية والقشرة المحيطية التى كشطت من اللوح الهابط. وتمثل جزيرة سومطرة فى إندونيسيا جزءا من قوس صهارى يتاخمه حوض أمام قوس . ويوجد خلف القوس البركانى **حوض خلف القوس**

backarc basin له قاع يتكون من قشرة محيطية بازلتية . ويمثل بحر اليابان بين قارة آسيا وجزر اليابان مثالا جيدا لحوض خلف القوس مصاحب لحد لوح محيطي- محيطى .

وتتواجد معظم أقواس الجزر البركانية فى الوقت الحالى فى حوض المحيط الهادى وتشمل جزر الأليوشن Aleutian Islands وقوس كرماديك– تونجا Kermadec Tonga arc وجزر اليابان والفلبين ، بينما تتواجد أقواس جزر سكوتيا والأنتيل (كاريبى) Scotia and Antillean island arcs فى حوض المحيط الأطلنطى .

الحدود المحيطية – القارية: عندما يتقارب لوحان أحدهما محيطى والآخر قارى ، فإن اللوح المحيطى الأكثر كثافة يندس تحت اللوح القارى على امتداد **حد لوح محيطى– قارى oceanic-continental plate boundary** (شكل 24.17ب) . ويكوّن اللوح المحيطى الهابط الجدار الخارجى للخندق المحيطى ، كما هو الحال فى الحدود المحيطية – المحيطية.

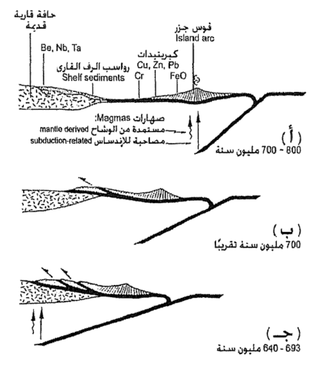
وعندما يهبط اللوح المحيطى البارد ، والمحتوى على الماء ، والأعلى فى الكثافة فى الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) الساخن ، فإنه يحدث انصهار وتتكون صهارة . وتصعد تلك الصهارة تحت اللوح القارى العلوى الراكب ، لتطفح عند السطح لتكون سلسلة من البراكين الأنديزيتية (مع القليل من الداسيت والريوليت) تعرف **بالقوس البركانى القارى continental volcanic arc** ، أو تتداخل فى العمق فى الحافة القارية على هيئة بلوتونات plutons (خاصة الباثوليثات).

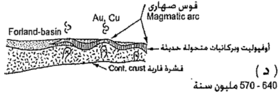
وتكون تجمعات الصخور النارية فى الأقواس البركانية القارية أكثر سيليكية (فلسية) من تلك الموجودة فى أقواس الجزر ؛ لأن الصهارة المتكونة فى الوشاح ربما تهضم وتبتلع القشرة القارية المنصهرة أثناء عملية التمثل . وتوجد فى تلك الأحزمة الصهارية صخور متحولة ، تنشأ نتيجة إعادة التبلور تحت درجات الحرارة المرتفعة والضغوط المنخفضة. وتحدث هذه الظروف لأن السوائل الساخنة تصعد بالقرب من السطح، حيث تسبب ارتفاع درجات حرارة هذه البيئة المنخفضة الضغط.

وتمتد أقواس الجزر موازية للخنادق المحيطية ، وعلى مسافة يمكن مقارنتها بزاوية ميل اللوح الهابط المندس . فتكون الأقواس البركانية أبعد عن الخندق عندما تكون نطاقات الاندساس قليلة الميل ، بينما تكون الأقواس البركانية أقرب من الخندق نتيجة اندساس اللوح بميل حاد .

ويمثل شاطئ المحيط الهادى لأمريكا الجنوبية مثالا مميزا لحد لوح محيطى- قارى ، حيث يندس لوح نازكا المحيطى تحت لوح أمريكا الجنوبية . كما تقدم سلسلة جبال البحر الأحمر بمصر مثالا لاندساس لوح محيطى تحت لوح آخر قارى فى زمن ما قبل الكمبرى ليكوّن تلك السلسلة من الجبال الممتدة موازية للبحر الأحمر بمصر (شكل 26.17) .

الحدود القارية– القارية: عندما يتقارب لوحان قاريان على امتداد **حد لوح قارى – قارى continental plate boundary–continental** ، فإن أحد اللوحين قد ينزلق جزئيا تحت الآخر، ولكن لا يندس أى من اللوحين بسبب كثافتهما المنخفضة وتساويهما فى السمك الكبير ويبقيان طافيان (شكل 24.17جـ) . وقبل أن يحدث التصادم القارى ، فإن القارات تكون فى أول الأمر مفصولة عن بعضها البعض بواسطة قشرة محيطية تندس تحت إحدى القارتين .





شكل (**26.17**): شكل يوضح التطور التكتونى لسلسلة جبال البحر الأحمر بالصحراء الشرقية المصرية ، التى تعتبر مثالاً لاندساس لوح محيطى تحت لوح آخر قارى .

أ) مرحلة قوس جزر **island arc stage**

ب) دفع تتابعات الأوفيوليت والصخور البركانية المكونة لأقواس الجزر والفتاتيات البركانية **volcaniclasts** على امتداد أسطح صدوع دسر **thrust faults** فوق حافة قارية قديمة

ج) مرحلة اندساس وانصهار القشرة الأرضية وصعود الصهارة

د) قطاع جانبى (بروفيل) على امتداد طريق قفط – القصير بالصحراء الشرقية بمصر خلال المرحلة السابقة .

(After El-Gabi, S. List, F.K. and Tehrani, R., 1988: Geology, evolution and metallogenesis of the Pan-African Belt in Egypt. In El-Gabi and Greiling, R. (editors), The Pan-African belt of northeast Africa and adjacent areas, Friedr. Vieweg Sonh and Braanschweig/Wiesbaden).

ويتميز هذا الحد القارى بمميزات الحد القارى– المحيطى مع تكون خندق محيطى عميق وقوس بركانى. وفى النهاية ، فإن القشرة المحيطية تستهلك كلية وتصطدم القارتان . ويتكون نطاق عريض يتميز بالتشوه الشديد عند حد التصادم ، حيث تطحن القارتان كلا منهما الأخرى. ويتميز هذا الحد بوجود حزام من الجبال مقطوع بعديد من صدوع الدسر thrust faults وزيادة سمك القشرة القارية بدرجة كبيرة فى نطاق الاصطدام .

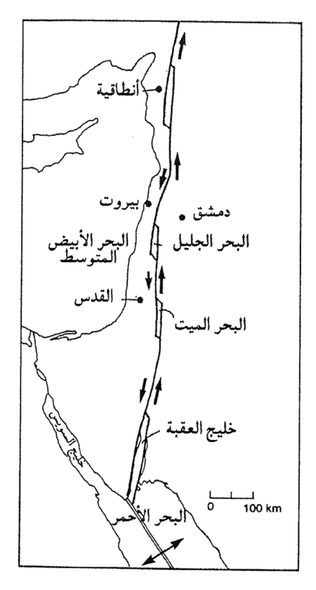
وتمثل جبال الهيمالايا مثالا لتصادم القارات الذى بدأ منذ 40–50 مليون سنة ، حيث اصطدم لوح الهند مع اللوح الأوروآسيوى. وما زالت عملية رفع الصخور مستمرة مع التصدع وعديد من الزلازل الكبيرة المستمرة حتى الآن ، مثل زلزال باكستان الذى حدث يوم السبت 8 أكتوبر 2005 م وبلغت قوته 7.6 على مقياس ريختر وراح ضحيته ما يقرب من أربعة وسبعين ألف قتيل وحوالى مائتى ألف جريح ، كما شرد ما يقرب من 4 مليون نسمة .

3. الحدود الناقلة

تعتبر الحدود الناقلة **transform boundaries** أحد أنواع حدود الألواح . وتوجد تلك الحدود على امتداد الصدوع الناقلة ، حيث تنزلق الألواح أفقيا بالنسبة لبعضها البعض موازية تقريبا لاتجاه حركة اللوح . وبالرغم من أنه لا يتكون أو يستهلك غلاف صخرى على امتداد الحد الناقل ، إلا أن الحركة بين اللوحين تتسبب فى وجود نطاق من الصخور المحطمة بشدة ، وعديد من الزلازل ضحلة البؤرة .

والصدوع الناقلة **transform faults** هى صدوع رأسية تقريبا ، مضربية الانزلاق تقطع الغلاف الصخرى . وهى نوع خاص من الصدوع ينقل أو يغير نوع معين من الحركة بين الألواح إلى نوع آخر من الحركة . وتصل غالبية الصدوع الناقلة بين جزئين من الحيود المحيطية ، إلا أن بعضها يصل أيضا بين الحيود المحيطية والخنادق المحيطية ، وكذلك بين الخنادق والخنادق . وعلى الرغم من أن معظم الصدوع الناقلة

ومن المعروف أن عديدًا من الزلازل التى تؤثر فى كاليفورنيا هى نتيجة الحركة على هذا الصدع . ويمثل نطاق صدع البحر الميت المقابل لصدع سان أندرياس فى النصف الشرقى للكرة الأرضية . ويمتد نطاق صدع البحر الميت عبر فلسطين ، مما أدى إلى طوبوغرافية مميزة للمنطقة التى تضم أحواض خليج العقبة والبحر الميت وبحر الجليل (شكل 27.17) .



شكل (**27.17**): خريطة توضح صدع البحر الميت (صدع ناقل **transform fault**) . يلاحظ وجود عدد من الأحواض بين الصدوع شبه المتوازية ، كما يتميز حوض البحر الميت بأنه عميق ويبلغ سمك الرواسب به سبعة كيلومترات تحت سطح الماء .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

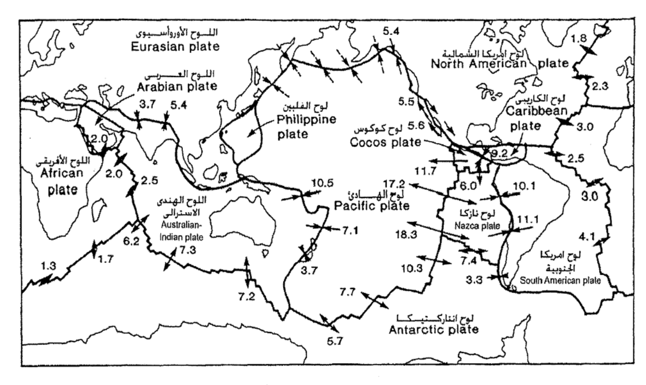
تقع فى قشرة محيطية وتكون مميزة بنطاقات تكسير ، إلا أنها قد تمتد أيضا فى القارات . ويمثل صدع سان أندرياس San Andreas fault فى كاليفورنيا أحد الأمثلة المعروفة للصدوع الناقلة ، حيث يفصل هذا الصدع بين لوح المحيط الهادى و لوح أمريكا الشمالية .

ب – حركة الألواح

تلقى فكرة حركة الألواح قبولا واسعا بين الجيولوجيين ، على الرغم من أن أسباب تلك الحركة مازالت محل جدل حتى الآن . وتتحرك الألواح بعيدا عن حيود وسط المحيط أو أى محور انتشار . بينما تتحرك بعض الألواح ناحية الخنادق المحيطية . وسنتناول فيما يلى الحركات النسبية والمطلقة للألواح ، وميكانيكية تحرك الألواح .

1 - الحركة النسبية للألواح

من المعروف أن كل الألواح تتحرك . لذلك لا يوجد كتلة فوق سطح الأرض غير متحركة تماما يمكن استخدامها كمرجع لتقدير حركة كل الأجزاء الأخرى المتحركة . ولقد أثبتت بعض الأدلة أن حيود وسط المحيط تتحرك فعلا . فعندما يوجد لوحان متلامسان ، فإن حركتهما النسبية تحدد ما إذا كان الحد بينهما نطاق انتشار أو نطاق اندساس أو صدع ناقل . ولكن ما السرعة التى تتحرك بها ألواح الكرة الأرضية وفى أى اتجاه تتحرك؟ وهل تتحرك كل الألواح بمعدل سرعة واحد؟ . يمكن حساب معدل تحرك الألواح بطرق عديدة ، ولكن أقل الطرق دقة هى طريقة تحديد عمر الرواسب الموجودة مباشرة فوق أى جزء من أجزاء القشرة المحيطية ، وقسمة هذا العمر على المسافة من حيود الانتشار ، وتعطى تلك الحسابات متوسط معدل تحرك اللوح .



شكل (28.17) : خريطة للألواح الرئيسية ، وتوضح الأسهم اتجاهات حركة تلك الألواح ، كما تظهر أيضا سرعة الحركة بالسنتيمتر فى السنة .
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

وهناك طريقة أكثر دقة تشمل تحديد كل من متوسط معدل التحرك والحركة النسبية ، عن طريق تحديد عمر الانعكاسات المغناطيسية فى قشرة قاع المحيط. وتشير المسافة بين محور الحيد المحيطى وأى انعكاس مغناطيسى إلى عرض قاع المحيط الجديد الذى تكوّن خلال تلك الفترة الزمنية . وهكذا فإنه كلما زاد عرض شريط قاع المحيط ، كانت السرعة التى تحرك بها اللوح أكبر . وبهذه الطريقة ، فإنه يمكن تحديد متوسط معدل التحرك الحالى والحركة النسبية ، بالإضافة إلى متوسط معدل التحرك فى الماضى ، عندما تتم قسمة المسافة بين الانعكاسات على الزمن المنقضى بين تلك الانعكاسات .

ومن الواضح من المعلومات المبينة فى شكل (28.17) أن معدل التحرك يتغير من لوح إلى آخر . كما يوضح الشكل أيضا أن الجزء الجنوبى الشرقى من لوح المحيط الهادئ ولوح كوكس هما أسرع الألواح تحركا ، بينما اللوحان العربى والجزء الجنوبى من اللوح الأفريقى أكثر بطئا .

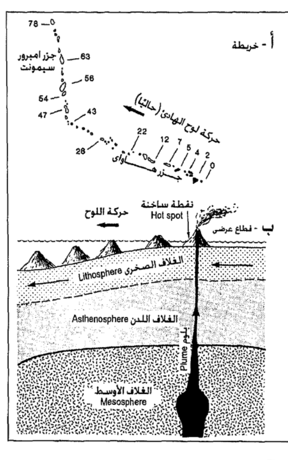
كما يمكن أيضا تقدير متوسط معدل التحرك وكذلك الحركة النسبية بين أى لوحين باستخدام تقنية أشعة الليزر. وعندما تبتعد الألواح عن بعضها البعض فإن شعاع الليزر يأخذ وقتا أكبر ليتحرك من المحطة المرسلة إلى القمر الصناعى الثابت ثم إلى المحطة المستقبلة . ويستخدم هذا الوقت الذى انقضى فى حساب معدل الحركة والحركة النسبية بين اللوحين.

2. الحركات المطلقة للألواح

إن حركة الألواح المستنتجة من الانعكاسات المغناطيسية والأقمار الصناعية والليزر هى الحركة النسبية للوح ما بالنسبة للوح آخر . فعندما يتحرك لوحان ناحية بعضهما البعض بسرعة 2 سم/ سنة للوح الأول و 6 سم/ سنة للوح الثانى فإن معدل التقارب بين اللوحين يكون 8 سم/ سنة . ولكى نحصل على

الحركة المطلقة ، فإنه يجب أن نجد مرجعا ثابتا يمكن حساب معدل حركة اللوح واتجاهه مثل وجود أى نقطة غير متحركة على سطح الوشاح فى باطن الأرض. وهنالك مثال مألوف يوضح الفرق بين الحركة المطلقة والحركة النسبية عندما تتجاوز سيارة على الطريق سيارة أخرى ، فإذا كان سائقو السيارتين لا يريان بعضهما البعض ولا يستطيعان ملاحظة الأرض أو أى شئ ثابت خارج سيارتيهما ، فإنهما يستطيعان فقط تقدير الفرق فى السرعة بين السيارتين . فعندما تتجاوز سيارة سرعتها 100 كم/ ساعة سيارة أخرى سرعتها 90 كم/ ساعة فيمكن فى هذه الحالة تقدير السرعة النسبية فقط ، وهى 10 كم . ومن ناحية أخرى ، إذا استطاع السائقان قياس سرعة سيارتيهما بالنسبة لشيء مرجعى ثابت ، مثل سطح الأرض فإنهما يستطيعان تقدير السرعتين المطلقتين لسيارتيهما وهما 100 كم/ ساعة و90 كم/ ساعة . ويمكن اتخاذ النقاط الساخنة **hot spots** كنقاط مرجعية . وتعرف النقاط الساخنة بأنها مواقع نقاط صغيرة فوق سطح الأرض ، تصعد إليها ببطء أعمدة مستقرة من تيارات الصهارة التى تنشأ على أعماق كبيرة فى الوشاح (بلومات وشاح mantle plumes) ، وتكون تلك الأعمدة براكين أو فيوضًا بازلتية (شكل 29.17) .

وتعتبر سلسلة جزر إمبرور سيمونت Emperor Seamount Chain بهاواى أحد الأمثلة المهمة على النشاط البركانى فوق نقطة ساخنة . وتوجد البراكين النشطة فى هذه السلسلة من الجزر البركانية فوق جزيرة هاواى Hawaii island ولويهى سيمونت Loihi Seamount . وقد نشأت بقية الجزر والجبال البحرية فى تلك الجزر من أصل بركانى أيضا. وهى تكون أقدم عمرا كلما تقدمنا فى اتجاه غرب –شمال غرب على امتداد سلسلة هاواى ، وكلما تقدمنا أيضا فى اتجاه شمال – شمال غرب على امتداد سلسلة إمبرور سيمونت .



شكل (**29.17**): نقطة ساخنة ومسارها .

أ) خريطة توضح سلسلة جزر هاواى – امبرورسيمونت والبراكين التى يمدها البلوم بالصهارة . وتوضح الخريطة العمر المطلق للبراكين وحركة اللوح الهادىء مع مرور الزمن.

ب) قطاع عرضى يوضح صخور وشاح ساخنة ترتفع لأعلى عبر الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) والقشرة كبلوم plume تمد البركان بالصهارة . وتمثل النقطة الساخنة hot spot موقع نقطة صغيرة فوق سطح الأرض يشير إلى البلوم ، وهى نقطة ثابتة تقريبا . وكلما واصل لوح الغلاف الصخرى حركته تكونت براكين جديدة .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ويرجع السبب فى أن تلك الجزر والجبال البحرية تكون أقدم عمرا كلما تقدمنا ناحية الشمال والشمال الغربى إلى أن لوح المحيط الهادئ قد تحرك فوق بلوم من الوشاح مستقر ظاهريا . وهكذا تتكون البراكين

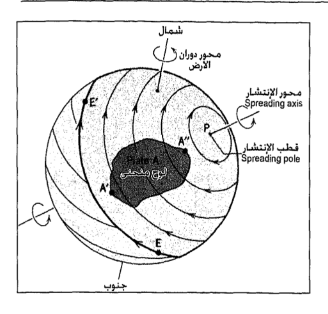
على امتداد خط بالقرب من وسط لوح المحيط الهادى محددة اتجاه حركة اللوح المحيطى . وفى حالة سلسلة إمبرور سيمونت بجزر هاواى فقد تحرك لوح المحيط الهادئ أولا فى اتجاه شمال – شمال غرب ثم فى اتجاه غرب – شمال غرب فوق نفس البلوم (شكل 29.17).

وتساعد البلومات والنقاط الساخنة الجيولوجيين فى شرح بعض النشاط الجيولوجى الذى يحدث داخل الألواح ، حيث إن معظم النشاط الجيولوجى يحدث عند حدود الألواح أو بالقرب منها . وبالإضافة إلى ذلك ، فإذا كانت بلومات الوشاح ثابتة تقريبا بالنسبة لمحور دوران الأرض – على الرغم من أن بعض الدلائل تدل على عكس ذلك – فإنه يمكن استخدام البلومات كنقاط مرجعية لتحديد خطوط العرض القديمة .

3. التغير فى سرعة الألواح

تكون السرعة النسبية لبعض الألواح الكبيرة أكبر بكثير من سرعة الألواح الأخرى (شكل 28.17) . ويبدو أن هذا الاختلاف فى سرعة الألواح مرتبط بحجم الغلاف الصخرى القارى ؛ فالألواح التى تتكون من غلاف صخرى محيطى فقط تكون سرعتها النسبية أكبر ، مثل سرعة ألواح المحيط الهادئ ونازكا وكوكوس ، بينما تكون السرعة النسبية للألواح التى لها غلاف صخرى قارى سميك أقل ، مثل اللوح الأفريقى ولوح أمريكا الشمالية والأوروآسيوى .

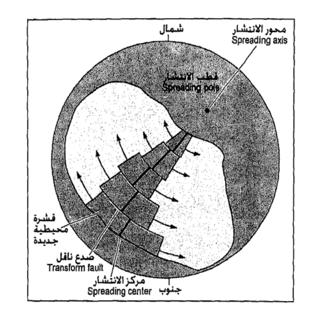
ويرجع السبب الثانى فى تغير سرعة الألواح إلى نوعية الحركة على جسم كروى ؛ حيث يفترض أن كل النقاط فوق اللوح الواحد تتحرك بالسرعة نفسها ، ولكن هذا غير صحيح. وقد يكون هذا الاعتقاد صحيحا ، إذا كانت ألواح الغلاف الصخرى منبسطة وتتحرك فوق غلاف لدن (أسثينوسفير) منبسط أيضا ،



شكل (30.17): حركة لوح منحنى على كرة . يمكن وصف حركة أى لوح من الغلاف الصخرى على سطح الأرض كدوران حول محور دوران اللوح نفسه . وتساوى سرعة اللوح صفرا عند النقطة (P) ؛ لأنها النقطة الثابتة التى يحدث حولها الدوران ، بينما تكون السرعة القصوى عند النقطة (A') والتى تقع بالقرب من خط الاستواء 'EE ، أما النقطة "A عند حافة اللوح فتكون سرعتها بطيئة لأنها أقرب إلى قطب دوران اللوح .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

مثل طفو قطعة منبسطة من الخشب فوق الماء . ولكن الغلاف الصخرى يتكون من ألواح تحيط بجسم الأرض الكروى ، وتكون هذه الألواح منحنية أو مقوسة وليست منبسطة . وتشير هندسة الغلاف الكروى ، إلى أن الحركة على السطح تكون دورانا حول محور . ونتيجة لمثل ذلك الدوران ، فإن الأجزاء المختلفة من اللوح الواحد تتحرك بسرعات مختلفة (شكل 30.17) ؛ حيث يتحرك اللوح فى الشكل السابق ويدور حول محور خاص يسمى **محور دوران اللوح plate rotation axis** مستقلا عن دوران الأرض حول محورها. وتعرف النقطة P فى الشكل السابق ، والتى تمثل نقطة اختراق محور الانتشار لسطح الأرض، بقطب دوران اللوح **pole rotation plate**.



شكل (31.17): العلاقة بين محور دوران اللوح plate rotation axis والحيد المحيطي والصدوع الناقلة فى لوحين متجاورين ، لهما مركز دوران مشترك ، وكل منهما مقطوع بصدوع ناقلة ، وتقع كل قطعة من الحيد المحيطي oceanic ridge على خط طول يمر خلال قطب دوران اللوح plate rotation pole ، بينما يقع كل صدع ناقل على خط مشابه لخط عرض حول قطب الدوران . ويزداد عرض القشرة المحيطية الجديدة كلما بعدنا عن قطب دوران اللوح .

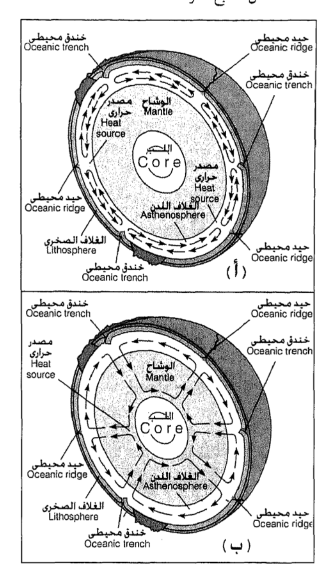
(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ويمكن وصف حركة كل لوح من ألواح القشرة الأرضية فى ضوء الدوران حول محور الانتشار ؛ حيث تعتمد سرعة كل نقطة على اللوح على المسافة بين هذه النقطة وقطب الانتشار . ونتيجة لاختلاف السرعات على اللوح الواحد ، فإن عرض القشرة المحيطية الجديدة التى تحد مركز الانتشار spreading center تزداد مع زيادة المسافة بين تلك القشرة وقطب الانتشار (شكل 31.17). والنتيجة الثانية لهذا الاختلاف فى السرعات أن إسقاط مركز الانتشار الذى تتباعد الالواح المحيطية على امتداده يمر عبر قطب الانتشار ، حيث يماثل هذا الإسقاط خط طول يمر خلال قطب الانتشار ، بينما يقع كل صدع ناقل على خط مشابه لخط عرض حول قطب الانتشار .

4. الميكانيكية المحركة لتكتونية الألواح

لقد كانت العقبة الرئيسية أمام قبول نظرية الانجراف القارى عدم وجود الميكانيكية المحركة لشرح حركة القارات . وعندما اتضح أن القارات وقيعان المحيطات تحركت مع بعضها وليست منفصلة عن بعضها البعض ، وأن قشرة محيطية جديدة تكونت عند حيود الانتشار من الصهارة الصاعدة ، قَبِل معظم الجيولوجيين وجود نوع من نظام الحمل الحرارى كعملية أساسية مسئولة عن حركة الألواح . وعلى الرغم من ذلك فما زال التساؤل قائما ، عن الميكانيكية التى تسبب حركة الألواح .

وكما سبق أن أوضحنا ، فإنه يمكن وصف الوشاح بأنه مادة ساخنة صلبة قادرة على الانسياب وبسرعة تصل لعدة سنتيمترات فى العام .وقد اقُترح نموذجان لشرح حركة الألواح ، يشتمل كل منهما على **خلايا حمل حرارية thermal convection cells** (شكل 32.17) . وفى أحد النموذجين ، ينحصر وجود خلايا الحمل الحرارى فى الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، أى فى الجزء العلوى من الوشاح فقط ، بينما تشمل تلك الخلايا كل الوشاح فى النموذج الثانى . وفى كلا النظامين يميز **حيود الانتشار spreading ridges** الأجزاء الصاعدة من خلايا الحمل الحرارى ، بينما توجد الخنادق المحيطية عند الأماكن التى تهبط فيها خلايا الحمل الحرارى ، وتعود مرة أخرى إلى باطن الأرض . وهكذا يتم تحديد مواقع حيود الانتشار والخنادق المحيطية بواسطة خلايا الحمل الحرارى . وهكذا فإن كل لوح يقابل خلية حمل حرارى واحدة .



شكل (**32.17**): نموذجان لشرح كيف تعمل تيارات الحمل على تحريك الألواح .

أ) فى النموذج الأول يقتصر وجود خلايا الحمل الحرارية على الغلاف اللدن (الأسثينوسفير)

ب) فى النموذج الثانى تشمل خلايا الحمل الوشاح بأكمله .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd edition. West Publishing Company, Minneapolis).

وعلى الرغم من أن معظم الجيولوجيين يتفقون على أن باطن الأرض يلعب دورا مهمًّا فى حركة الألواح ، إلا أن هناك مشكلات تواجه كلا من النموذجين السابقين . والمشكلة الأساسية التى تواجه النموذج الأول هو صعوبة شرح مصدر الحرارة اللازم لخلايا الحمل ، ولماذا تنحصر هذه الخلايا فى الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) ، بينما يعتقد فى النموذج الثانى ، أن مصدر الحرارة يأتى من اللب الخارجى للأرض . ولكن لا زالت ميكانيكية انتقال الحرارة من اللب الخارجى إلى الوشاح مجهولة حتى الآن ، وكذلك لماذا تشمل خلايا الحمل الحرارى كلا من الوشاح السفلى والغلاف اللدن ؟ .

ويقترح بعض الجيولوجيين أنه بالإضافة إلى خلايا الحمل الحرارى داخل الأرض ، فإن حركة الألواح تحدث جزئيا أيضا بسبب ميكانيكية أخرى تشمل ما يعرف بجذب أو سحب اللوح "slab-pull" أو دفع الحيد"ridge push" . وتعتبر الجاذبية الأرضية هى العامل المحرك فى كل من الميكانيكيتين المقترحتين ، بالإضافة إلى الفروق فى درجات الحرارة داخل الأرض. ففى ميكانيكية "جذب اللوح" يجذب اللوح البارد المندس من الغلاف الصخرى بقية اللوح معه أثناء هبوطه واندساسه فى الغلاف اللدن ، نظراً لأنه أعلى كثافة من صخور الغلاف اللدن الأكثر دفئا والمحيط باللوح الهابط. وعندما يهبط الغلاف الصخرى لأسفل ، فإنه يحدث انسياب مقابل لأعلى فى حيود الانتشار نتيجة تصاعد الصهارة.

وتعمل فى الوقت نفسه مع ميكانيكية "جذب اللوح" ميكانيكية أخرى ، هى "دفع الحيد"؛ فنتيجة لصعود الصهارة فإن الحيود المحيطية تكون أعلى من القشرة المحيطية المجاورة. ويعتقد أن الجاذبية تدفع الغلاف الصخرى المحيطى نتيجة وزن الحيد المرفوع بعيدا عن حيود الانتشار وفى اتجاه الخنادق المحيطية. ولم يتضح بعد إلى أى حد يمكن أن تساهم أى من الميكانيكيتين فى حركة الألواح. ولذلك ، فإن نظرية تكتونية الألواح لم تكتمل حتى الآن

VI- تكتونية الألواح والرواسب المعدنية

تؤثر تكتونية الألواح - بالإضافة إلى كونها مسئولة عن المعالم الرئيسية للقشرة الأرضية - فى تكوين وتوزيع بعض مصادر الثروة الطبيعية. ولذلك، يستخدم الجيولوجيون نظرية تكتونية الألواح فى البحث عن رواسب معدنية جديدة وفى شرح تواجدات الرواسب المعروفة. وسيتم مناقشة العلاقة بين تكتونية الألواح والرواسب المعدنية فى الفصل التاسع عشر.

الملخص

1- إن مفهوم حركة الألواح ليس جديداً؛ فقد أمدتنا الخرائط الأولى التى توضح التشابه بين الساحل الشرقى لأمريكا الجنوبية والساحل الغربى لأفريقيا بالدليل الأول على أن القارات ربما كانت متحدة يوماً ما، ثم انفصلت بعد ذلك عن بعضها البعض.

2- يرجع الفضل فى تطور فرضية الانجراف القارى إلى ألفريد فاجنر الذى قدم عديدًا من الأدلة الجيولوجية والحفرية ليوضح أن القارات كانت متحدة فى قارة واحدة عظمى أسماها بانجيا. ولسوء الحظ لم ينجح فاجنر فى شرح كيف تحركت القارات، ولذلك أهمل معظم الجيولوجيين أفكاره.

3- ازدهرت فرضية الانجراف القارى خلال خمسينيات القرن العشرين، حيث أوضحت دراسة المغناطيسية القديمة وجود عديد من أقطاب مغناطيسية شمالية بدلاً من قطب شمالى واحد، كما هو الوضع حاليا. ولقد تم حل تلك المشكلة بتحريك القارات إلى مواقع مختلفة، بحيث تتفق نتائج المغناطيسية القديمة مع وجود قطب مغناطيسى شمالى واحد.

4- أظهرت نتائج المسح المغناطيسى للقشرة المحيطية وجود شاذات مغناطيسية فى الصخور تشير إلى أن المجال المغناطيسى للأرض انعكس فى الماضى كثيرا من المرات. وحيث إن تلك الشاذات تكون أحزمة متماثلة ومتوازية على جانبى الحيود المحيطية، فإن تلك النتائج تشير إلى أن هناك قشرة محيطية جديدة قد تكونت أثناء انتشار قاع المحيط.

5- تأكدت فرضية انتشار قيعان المحيطات نتيجة تقدير عمر الرواسب التى تعلو القشرة المحيطية، والتاريخ الإشعاعى لصخور الجزر المحيطية. وتوضح تلك الأعمار أن القشرة المحيطية تصبح أقدم فى العمر كلما بعدت عن الحيود المحيطية.

6- لاقت نظرية تكتونية الألواح قبولاً واسعاً خلال سبعينيات القرن العشرين نتيجة تجمع عدد كبير من الأدلة التى تدعم تلك النظرية، وبسبب أن تلك النظرية أمدت الجيولوجيين بشرح لبعض الظواهر المهمة مثل النشاط البركانى والنشاط الزلزالى وبناء الجبال وتغير مناخ الأرض وتوزيع النباتات والحيوانات فى الماضى والوقت الحاضر وتوزيع الرواسب المعدنية.

7- ترتكز نظرية تكتونية الألواح على نموذج بسيط للأرض، حيث يتكون الغلاف الصخرى الصلب للأرض من عدد من القطع المختلفة الحجم، والتى تسمى ألواحا.

8- تم التعرف على ثلاثة أنواع من حدود الألواح وهى الحدود المتباعدة حيث تتحرك الألواح بعيداً عن بعضها البعض، والحدود المتقاربة حيث

يقترب أو يصطدم لوحان ، والحدود الناقلة حيث ينزلق لوحان أفقيا بالنسبة لبعضهما البعض على امتداد صدوع مضربية كبيرة.

9- يمكن حساب متوسط معدل حركة الألواح وحركتها النسبية بعدة طرق. وتتفق نتائج هذه الطرق المختلفة وتشير إلى أن الألواح تتحرك بسرعات مختلفة.

10- يمكن حساب الحركة المطلقة للألواح من حركة الألواح فوق بلومات الوشاح. وبلوم الوشاح هو عمود ثابت ظاهر من الصهارة التى تصعد إلى سطح الأرض ؛ لتصبح نقطة ساخنة وتكون بركانًا .

11- على الرغم من عدم تقديم نظرية شاملة عن الميكانيكية التى تسبب حركة الألواح حتى الآن، إلا أن معظم الجيولوجيين يقترحون وجود نوع من نظام حمل حرارى يسبب حركة الألواح.

12- توجد علاقة قوية بين تكون وتوزيع بعض الرواسب المعدنية وحدود الألواح. ويستخدم الجيولوجيون نظرية تكتونية الألواح فى شرح تواجدات الرواسب المعدنية المعروفة ، وفى البحث عن رواسب معدنية جديدة.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://webspinners.com/dlblanc/tectonic/ptABCs.shtml
http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html
http://www.uky.edu/ArtsSciences/Geology/webdogs/plates/reconstructions.html
http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/images.html
http://imager.ldeo.columbia.edu/
http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/mggd.html
http://www-odp.tamu.edu/

المصطلحات المهمة

backarc basin	حوض خلف قوس	Pangaea = Pangea	بانجيا (القارة الأم)
continental- continental plate boundary	حد لوح قارى – قارى	plate	لوح
continental drift	انجراف قارى	plate rotation axis	محور دوران اللوح
continental volcanic arc	قوس بركانى قارى	plate rotation pole	قطب دوران اللوح
convergent plate boundary	حد لوح متقارب	plate tectonic theory	نظرية تكتونية الألواح
divergent plate boundary	حد لوح متباعد	rift valley	وادى خسف
forearc basin	حوض أمام القوس	seafloor spreading	انتشار قيعان المحيطات
Glossopteris flora	فلورة جلوسوبتيرس	sheeted dykes	قواطع صفائحية
Gondwana	جندوانا	spreading centers	مراكز انتشار
hot spot	نقطة ساخنة	spreading ridge	حيود انتشار (حيود انفراج)
Laurasia	لوراسيا	subduction	اندساس
magmatic arc	قوس صهارى	thermal convection cell	خلية حمل حرارى
magnetic reversal	انعكاس مغناطيسى	transform boundary	حد ناقل
oceanic – continental plate boundary	حد لوح محيطى – قارى	transform fault	صدع ناقل
oceanic – oceanic plate boundary	حد لوح محيطى – محيطى	volcanic island arc	قوس جزر بركانى
ophiolite suite	مجموعة أوفيوليتيه		
orogeny	تجبل (نشأة الجبال)		

الأسـئلة

1- ما الأدلة التى أقنعت فاجنر أن القارات كانت ملتحمة يوماً ما ثم انفصلت بعد ذلك؟ ولماذا عارض العلماء قبول فكرة فاجنز فى بداية الأمر؟

2- لماذا لا يمكن استخدام التشابه بين خطوط شواطئ القارات وحده كدليل على أن تلك القارات كانت متصلة يوما ما؟

3- اذكر أهمية التجوال القطبى وعلاقته بالانجراف القارى.

4- كيف يمكن استخدام الشاذات المغناطيسية لتفسير انتشار قيعان المحيطات ؟ وما الأدلة الأخرى التى أقنعت الجيولوجيين بتلك الفرضية؟

5- لماذا تعتبر تكتونية الألواح نظرية شاملة وقوية ؟

6- اذكر باختصار الملامح الجيولوجية المميزة للأنواع الثلاثة من حدود الألواح ، اذكر مثالاً جغرافيا لكل نوع.

7- ما بلومات الوشاح وما النقاط الساخنة؟ وكيف يمكن استخدامها لتحديد اتجاه ومعدل حركة الألواح؟

8- ما الميكانيكية التى تسبب حركة الألواح؟

9- ما أنواع الصخور التى تتوقع أن تجدها بالقرب من حد تباعد ، وأيضا بالقرب من حد تقارب؟

10- ماالظروف التى أدت إلى تكون جبال الهيمالايا والأنديز؟

11- عرف الميلانج ، وما نوع التحول المصاحب لصخور الميلانج . وما الأماكن التى تتوقع أن تتكون فيها صخور الميلانج حاليا؟

12- ما قطب الانتشار؟ وكيف تعتمد سرعة اللوح على موقع اللوح بالنسبة لقطب الانتشار؟

13- كيف يمكن قياس سرعة الألواح؟ هل يعتبر تحديد عمر الانعكاسات المغناطيسية فى قشرة قاع المحيط تقديرًا للسرعة النسبية أم السرعة المطلقة للألواح؟

الفصل 18

تكتونية القشرة القارية وسلاسل الجبال

I. بعض التراكيب التكتونية الإقليمية

II. الأجزاء الداخلية المستقرة من القارات

III. أحزمة التجبل: بناء الجبال

أ. تراكيب الجبال

ب. عمليات بناء الجبال

1. بناء الجبال وأقواس الجزر: التجبل عند حدود الألواح المحيطية-المحيطية
2. بناء الجبال على امتداد الحواف القارية: التجبل عند حدود الألواح المحيطية-القارية
3. بناء الجبال نتيجة التصادم القارى: التجبل عند حدود الألواح القارية-القارية
4. بناء الجبال وتكتونية الألواح الصغيرة

IV. خسف القارات

أ. الخسف ثلاثى الأذرع والنقاط الساخنة

ب. المعالم الجيولوجية لوديان الخسف القارية

V. الحواف المستقرة للقارات

VI. الحركات الرأسية الإقليمية

تغطى المحيطات حوالى 71٪ من سطح الأرض. ويوجد أسفل أحواض المحيطات قشرة محيطيه يقل عمرها عن 200 مليون سنة . وتنشأ أحواض المحيطات عند حيود وسط المحيط ، حيث يتكون باستمرار غلاف صخرى جديد من الصهير الصاعد من الوشاح ، والذى ينتشر ويبرد . وحيث إن الغلاف الصخرى المحيطى يستهلك حينما يهبط فى نطاقات الاندساس، فإن قيعان المحيطات الحالية، لا تمثل إلا 4٪ فقط من تاريخ الأرض ، الذى يصل إلى حوالى 4.6 بليون سنة. بينما تحتوى القارات على صخور يرجع عمرها إلى حوالى 4 بليون سنة ؛ لذلك يجب فحص صخور القارات التى تشمل معظم التاريخ الجيولوجى؛ حيث يعتقد أن صخور القشرة الأرضية التى تكونت خلال الخمسمائة مليون سنة الأولى من تاريخ الأرض قد دمرت واستهلكت نتيجة قذفها بشدة بالنيازك فى ذلك الوقت المبكر من تاريخ الأرض .

ويعتقد أن فترة الأربعة بلايين سنة من التطور الجيولوجى المسجلة فى القشرة القارية هى فترة طويلة ومعقدة. ومع ذلك، فإننا بدأنا فى تفسيرها وفهمها بطريقة أفضل اعتماداً على بعض المفاهيم المستمدة من نظرية تكتونية الألواح . ويعتقد الآن أن التشوه يتم فقط فى قشرة الأرض الصلبة الخارجية أى فى الغلاف الصخرى الذى يتراوح سمكه بين 100 و 200 كم. وهذا السمك يعتبر قليلا جداً إذا ما قورن بسمك الوشاح ولب الأرض الذى يبلغ حوالى 6300 كم. وترجع أهمية دراسة سلاسل الجبال إلى معرفة تاريخ الأرض وتشوهها وأصل الرواسب المعدنية ، بالإضافة إلى معرفة تأثير الجبال على جيولوجية وجغرافية العالم .

وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن رفع سلاسل الجبال يمكن أن يؤثر على المناخ فى العالم ، كما يغير أيضا من كيميائية المحيطات ومواقع تجمعات البترول والرواسب المعدنية أيضاً.

ويوضح البناء الجيولوجى للقارات أنها تتكون من (1) بقايا صخور قديمة جداً تم تعريتها داخل القارات، و (2) منظومات الجبال mountain systems بالقرب من حواف تلك القارات ، والتى تشوهت فى زمن أحدث . وتحدث عمليات بناء الجبال عندما تصطدم الألواح القارية ، حيث تتشوه وتدفع رواسب الحواف القارية فى سلسلة مطوية ومتصدعة. كما تحدث عمليات بناء الجبال عندما ينصهر اللوح المحيطى المندس تحت لوح محيطى أو لوح قارى ، وتصعد الصهارة فى الحزام المشوه. وتتسبب تحركات الألواح أيضاً فى نقل أجزاء مختلفة جيولوجياً ثم التحامها بذلك الحزام المشوه. وتؤدى التحركات لأعلى ولأسفل داخل القارات إلى نشأة أحواض داخلية interior basins وقباب domes وبقاء الجبال القديمة التى تم تعريتها مرة أخرى. وبعيداً عن الشواطئ، فإن التحركات إلى أسفل تسبب نشأة أحواض على الرفوف القارية . ويعالج هذا الفصل ، بعض التشوهات التى حدثت للقشرة الأرضية خلال الأربعة بلايين سنة الأخيرة من عمر الأرض .

ا. بعض التراكيب التكتونية الإقليمية

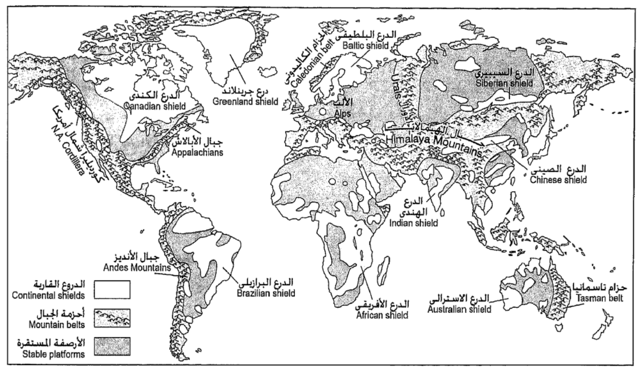
تغطى القارات حوالى ثلث سطح الأرض. ويمكن تقسيم الصخور التى تكون القشرة القارية إلى مجموعتين متميزتين:

1- صخور رسوبية غير مشوهة: وهى تشمل غطاء الصخور الرسوبية الذى تم ترسيبه ولم يتشوه بدرجة كبيرة.

2- صخور مشوهة: وهى تشمل المناطق المشوهة، والتى تتكون من صخور رسوبية ونارية ومتحولة تعرضت لقوى أرضية شديدة خلال العصور الجيولوجية المختلفة.

الطى والتصدع والنشاط النارى والتحول – بتطور القارات.

ويلاحظ أن توزيع مكونات القارات لا يكون عشوائياً، فتميل معظم الصخور التى تشوهت خلال سلسلة الأحداث القديمة لأن تتواجد داخل القارات، حيث أصبحت مستقرة نسبيا الآن، ويتم تعريتها لتصبح مسطحة تقريباً. ويوجد خارج هذه المناطق



شكل (**1.18**): خريطة توضح الدروع القارية **continental shields** ومعظم أحزمة الجبال **mountain belts** الرئيسية فى العالم.
(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

وتقع معظم القشرة القارية، سواء المنكشفة أو صخور القاعدة المدفونة تحت غطاء الصخور الرسوبية المتطبقة (وأحياناً صخور بركانية) ضمن صخور المجموعة الثانية، أى الصخور التى تشوهت وتغيرت نتيجة قوى القشرة الأرضية. وتمثل **صخور القاعدة basement rocks** تجمعًا من الصخور النارية والمتحولة (عادة ما تكون من صخور ما قبل الكمبرى أو الباليوزوى). ولذلك ترتبط بقوة عملية **التجبل orogeny** – وهى عمليات بناء الجبال والتى تشمل القديمة أحزمة الجبال النشطة الأحدث عمرا، والتى تكون معظم أنظمة الجبال الموجودة حالياً. وتقع أحزمة الجبال هذه عند حواف القارات حيث توضح ملامحها الطوبوغرافية أنها تتواجد فى أحزمة ضيقة وطويلة، مثل حزام الكورديليرا الذى يمتد على الحواف الغربية لأمريكا الشمالية وحزام الأبالاش الذى يمتد على الحافة الشرقية لأمريكا الشمالية، كما تمتد سلاسل الألب-الهيمالايا عبر الحدود الجنوبية لآسيا وأوربا (شكل 1.18). وتميل معظم أحزمة الجبال التى تشمل

جدول18-1: التراكيب الرئيسية أو العناصر التكتونية المكونة للقشرة الأرضية

العناصر المستقرة	العناصر غير المستقرة
الرسيخات القارية **continental cratons** ـ سهول قارية منبسطة ومنخفضة التضاريس، مع نشاط زلزالى أو بركانى قليل وقشرة فلسية (جرانيتية).	أحزمة التجبل **orogenic belts** ـ (أحزمة الجبال وأنظمة أقواس الجزر - الخنادق المحيطية) - براكين أنديزيتية، نشاط زلزالى ضحل إلى عميق، طى نتيجة قوى التضاغط وصدوع دسر، وتداخل باثوليتات جرانيتية، تحول إقليمى، سريان حرارى قليل.
السهول السحيقية المحيطية **oceanic abyssal plains** ـ سهول متسعة مسطحة من قاع المحيط، مع نشاط زلزالى أو بركانى قليل فقشرة بازلتية.	الحيود المحيطية **oceanic ridges** ـ جبال بازلتية فوق قيعان المحيطات مع نشاط زلزالى ضحل، صدوع نتيجة قوى الشد وانسياب حرارى عالٍ غير عادى.

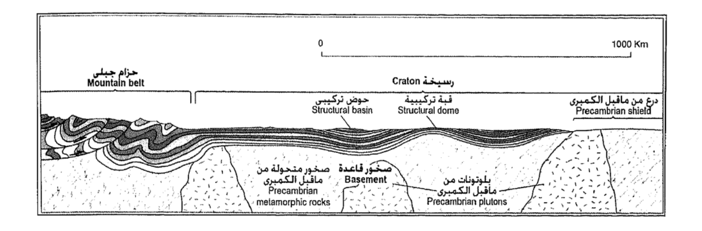
(Prothero, D.R. and Dott,Jr,R.H.;Evolution of the Earth, 2002)

مدودا جبلية مرتفعة لأن تكون أحدث عمرا من تلك الجبال المنخفضة تضاريسيا. فقد بدأت عملية بناء جبال الهيمالايا، والتى تشمل أعلى أحزمة الجبال فى العالم، من حوالى أربعين إلى خمسين مليون سنة فقط، ومازالت فى حالة نشاط حتى الآن، بينما توقفت عملية بناء جبال أحزمة الأبالاش المنخفضة تضاريسيا منذ حوالى 250 مليون سنة. ويوضح جدول (18-1) العناصر التكتونية للقشرة الأرضية والتى تشمل العناصر المستقرة وغير المستقرة (النشطة). وتنمو القارات عموماً من تجمع أجزاء من ألواح صغيرة بالتصادم، علاوة على إضافة مواد جديدة عند اندساس الألواح المحيطية. وتمثل الأحزمة الموجودة على حواف القارات المفتاح الذى يكشف العملية التى تؤدى إلى تشوه القشرة الأرضية القديمة، حيث مازال يوجد بها الكثير من سجل التشوه محفوظاً فى الصخور التى لم يتم تعريتها.

II. الأجزاء الداخلية المستقرة من القارات

تعرف الرسيخات **cratons** بأنها الأجزاء الداخلية المسطحة من القارات، والتى تغطى مساحات شاسعة وتكون مستقرة تكتونيا. وتتكون الرسيخات من الصخور القديمة التى تشوهت بشدة خلال زمن ما قبل الكمبرى وأصبحت مستقرة منذ ذلك الوقت. وتشمل الرسيخات مساحات كبيرة تسمى **دروع shields**، وهى تتكون من صخور القاعدة المتبلورة القديمة جداً التى انكشفت من تلك الرسيخات. وتمثل الدروع وصخور القاعدة فى الرسيخات جذور أحزمة جبال اكتملت عملية تشوهها منذ أكثر من بليون سنة مضت. ويمتد للخارج من تلك الدروع **أرصفة platforms** مستوية وعريضة من الصخور القديمة تكون مدفونة تحت رسوبيات وصخور رسوبية أحدث عمرا (شكل 2.18).

وهكذا تشمل الرسيخات كلاً من الدروع والأرصفة المدفونة، حيث إن الأرصفة تمثل جزءا من الرسيخة. ويمثل الدرع الكندى نموذجاً لدرع (شكل 3.18)، وهو يتكون فى معظمه من صخور جرانيتية ومتحولة (مثل النيس) مع صخور رسوبية وبركانية متحولة مشوهة بدرجة كبيرة. وتشير تلك التجمعات من الصخور إلى فترات بناء الجبال الشديدة خلال زمن

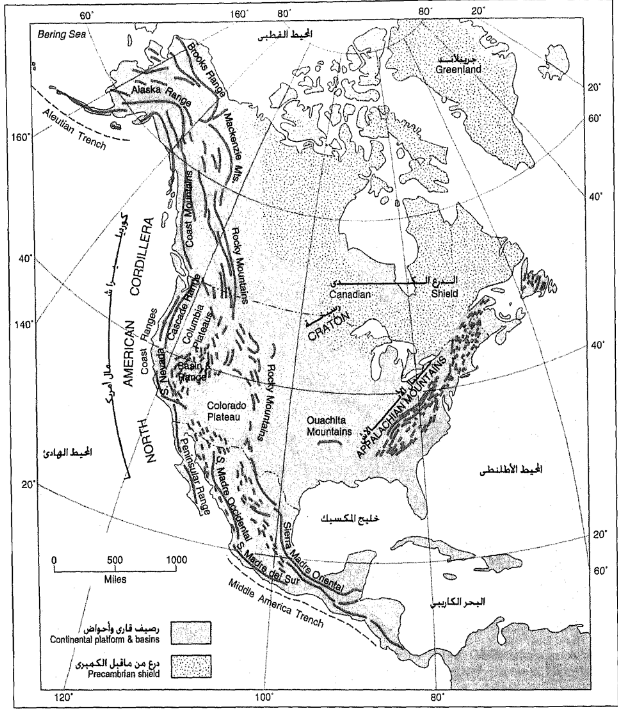


شكل (**2.18**): قطاع عرضى فى جزء من حزام جبلى mountain belt (إلى اليسار) وجزء من رسيخة craton . ويوضح الشكل أن الصخور الرسوبية فوق صخور القاعدة قد تعرضت لتقوس وانحناء لطيف على مستوى إقليمى واسع ، بينما تعرض الحزام الجبلى لتشوه متوسط إلى شديد جدا . لاحظ أن الدرع shield يمثل صخور قاعدة متبلورة قديمة جدًّا انكشفت من الرسيخة craton .
(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ما قبل الكمبرى ، والتى أعقبها فترة طويلة من الاستقرار ، حيث يدل عدم وجود تشوه حديث على استقرارها . وتشمل هذه المنطقة أحد أقدم سجلات التاريخ الجيولوجى . ويتميز الدرع الكندى بتواجد رواسب خامات الحديد والذهب والنحاس والنيكل . كما توجد دروع أخرى فى اسكندنافيا وفنلندا وسيبريا ووسط أفريقيا والبرازيل وأستراليا (شكل 1.18) .

ويوجد جنوب الدرع الكندى منطقة الرصيف الداخلى المغطاة بالرواسب ، والتى تكون مستوية تقريبا (شكل 3.18) ، وهى تشكل المنطقة الوسطى المستقرة من الولايات المتحدة . ويمثل هذا الرصيف امتدادا مستويا تقريبياً تحت سطح الأرض للدرع الكندى ، حيث يشمل صخور قاعدة مشابهة من ماقبل الكمبرى ولكنها مغطاة فى تلك المنطقة بغطاء من الصخور الرسوبية يبلغ سمكها أقل من 2 كم تقريباً تتبع حقب الحياة القديمة (الباليوزوى).

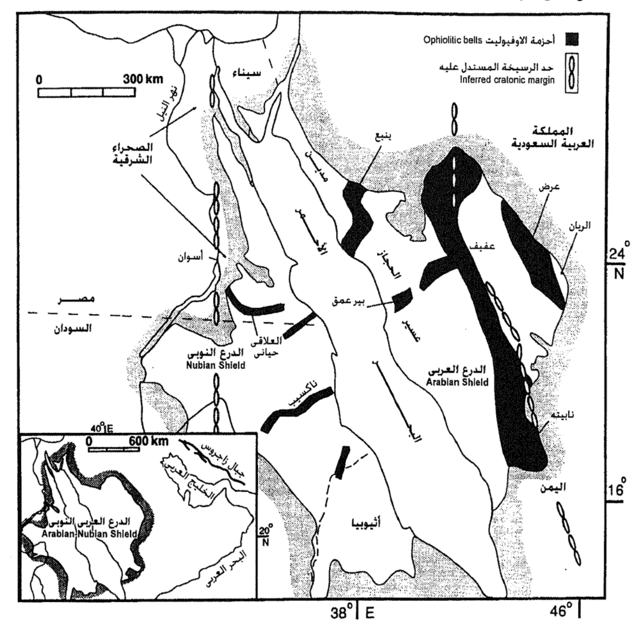
وقد وجدت رواسب الرصيف القارى فى شمال أمريكا فوق صخور القاعدة المشوهة منذ ما قبل الكمبرى والتى تم تعريتها تحت ظروف مختلفة . وتدل تجمعات تلك الصخور على أنها ترسبت فى بحار فوق قارية ضحلة ممتدة (صخور بحرية تشمل الحجر الرملى والحجر الجيرى والطفل ورواسب دلتا ومتبخرات) وفى سهول طميية أو فى بحيرات أو مستنقعات (رواسب غير بحرية ورواسب فحم). وتوجد معظم رواسب خامات اليورانيوم والفحم بالإضافة إلى الغاز والنفط فى الغطاء الرسوبى للرصيف المشار إليه.



شكل (3.18): الملامح التكتونية الرئيسية لأمريكا الشمالية وتشمل الدرع الكندى والرصيف الداخلى وحزام الكورديليرا وهضبة كولورادو وحزام جبال الأبالاش وبعض الجبال الرئيسية الأخرى.

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

ويشغل الدرع العربى النوبى Arabian-Nubian Shield مساحات كبيرة تصل إلى حوالى 10 مليون كيلو متر مربع فى شمال أفريقيا وغرب المملكة العربية السعودية، وهو مثال جيد على حدوث نشاط صهارى عند حدود ألواح متقاربة convergent boundaries.



شكل (4.18): خريطة توضح الدرع العربى النوبى Arabian-Nubian Shield الذى يشمل عددا من الألواح الصغيرة التى التحمت عند نطاقات درز suture zones . وتميز أحزمة الأوفيوليت والموضحة باللون الأسود نطاقات الدرز المختلفة فى الدرع العربى النوبى (ANS) . لاحظ امتداد صخور الدرع العربى النوبى تحت غطاء من الصخور الرسوبية من دهر الحياة الظاهرة (الفانيروزوى) من نهر النيل غربا إلى جبال زاجروس شرقا .

(After Sultan, M., Bickford, M.E., El Kaliouby, B. and Arvidson, R.E., 1992: Common Pb systematics of Precambrian granitic rocks of the Nubian Shield, Egypt and tectonic implications. Geol. Soc. Am. Bull., V.104, 456-470).

وعلى الرغم من إجماع معظم الدراسات على أهمية دور تكتونية الألواح فى نشأة الدرع العربى النوبى ، إلا أنه لازال هناك خلاف بين العلماء حول ميكانيكية تكوين القشرة الأرضية فى هذا الدرع ؛ حيث يعتقد بعض العلماء أنه نشأ فى زمن البروتيروزوى المتأخر (860 – 560 مليون سنة مضت) عند حافة قارية التحمت بها عدة أقواس جزر oceanic island arcs اندفعت على امتداد أسطح صدوع دسر thrust

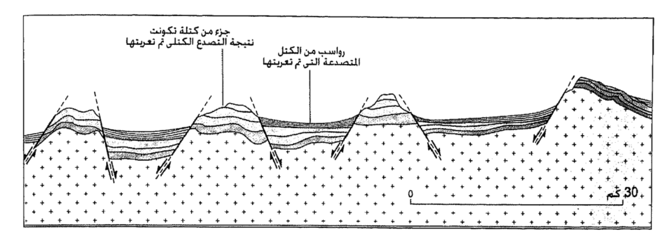
faults تقع فوق تلك الحافة . وتتميز الحدود التى نشأت عن عمليات درز (التحام) وتصادم أقواس الجزر بوجود صخور مافية وفوقمافية والمعروفة بالأوفيوليتات ophiolites (شكل 4.18) . كما استمرت عملية التشوه داخل الرسيخة craton الجديدة ، مما أدى إلى تكوّن صخور بركانية (متوسطة إلى فلسية) وصخور جرانيتية تداخلت فى الأعماق ، بالإضافة إلى تكوّن رواسب المولاس (سحنة رسوبية تقع بين الرواسب البحرية والقارية ، وتكون غير مفروزة) . كما تكونت فى الفترة منذ 630 – 550 مليون سنة مضت مجموعة من الصدوع أخذت اتجاه شمال غرب – جنوب شرق والمعروفة بنظام نجد Najd System ، مما أدى إلى زحزحة الجزء الشمالى من الرسيخة العربية إلى اتجاه شمال – غرب .

III. أحزمة التجبل: بناء الجبال

اجتذبت الجبال الموجودة فوق سطح الأرض انتباه الجيولوجيين أكثر مما اجتذبتهم المعالم الأرضية الأخرى. وقد تجمعت لدى العلماء خلال القرنين الماضيين كثير من المعلومات عن العمليات الداخلية التى تسبب نشأة هذه المعالم الأرضية المدهشة. وعندما يستخدم الجيولوجيون مصطلح جبل **mountain** فإنهم يشيرون إلى أى منطقة من اليابسة ترتفع بشكل ملحوظ عما حولها (300 متر على الأقل) . وتكون بعض الجبال معزولة ولها قمم واضحة ، ولكن من الشائع أن تتواجد الجبال كجزء من تتابع من المرتفعات الجبلية الممتدة طوليا ، وشديدة التقارب من بعضها ومتماثلة فى الوضع والاتجاه والعمر والأصل ، تعرف بالمدود الجبلية (مفردها مد جبلى) **mountain ranges** . كما تُعرف منظومة الجبال **mountain system** بأنها منطقة جبلية تتكون من عدة مدود جبلية ، تربطها ملامح مشتركة فى الشكل أو التركيب أو الاتجاه ، مثل جبال روكى والأبالاش . وتعرف المنظومات الجبلية بأنها نطاقات طولية معقدة ، تتميز بالتشوه الشديد وزيادة فى سمك القشرة الأرضية وبعض التراكيب الجيولوجية التى سبق شرحها . أما سلسلة الجبال **mountain chain** فهى سلسلة متصلة تضم عددا من المدود الجبلية ومنظومات الجبال المتوازية تقريبا ، تتجمع كلها فى سلسلة متصلة واحدة دون اعتبار لتماثلها فى الشكل أو التركيب أو العمر ، لكنها تشكل اتجاها محددا .

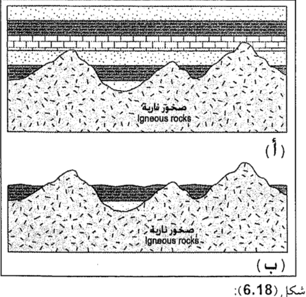
وتُعرف العمليات التى تؤدى إلى نشأة سلاسل الجبال بالتجبل (بناء الجبال) **orogenesis** ، وهو مصطلح مستمد من الكلمة اليونانية oros بمعنى جبل و genesis بمعنى نشأة . وتمثل الصخور التى تكون الجبال دليلا مرئيا على القوى التضاغطية الهائلة التى شوهت أجزاء كبيرة من القشرة الأرضية ، وتسببت بالتالى فى رفع تلك الأجزاء إلى وضعها الحالى. وعلى الرغم من أن الطى هو أكثر علامات التشوه تميزاً ، إلا أن صدوع الدسر والتحول والنشاط النارى تكون دائماً متواجدة ولكن بدرجات مختلفة.

وعندما يذكر الجيولوجيون عمليات بناء الجبال ، فإنهم يشيرون إلى أحزمة الجبال الرئيسية الموضحة فى شكل (1.18) ، وتشمل تلك المجموعة أحزمة الألب Alps والأورال Urals والهيمالايا Himalayas والأبالاش Appalachians والكورديليرا الأمريكية American Cordiellera. وتوجد أحزمة الجبال على كل قارة ، حيث تمتد لمئات أو حتى آلاف الكيلومترات. وسوف نستعرض هنا أهم نتائج تشوه القشرة الأرضية ، ألا وهى أحزمة التجبل الرئيسية على الأرض .



شكل (5.18): جبال تكونت نتيجة للتصدع الكتلى block-faulting ، حيث حدثت الحركة فيها على امتداد الصدوع العادية normal faults وارتفعت بعض الكتل بالنسبة للمناطق المجاورة .
(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

وتجدر الإشارة إلى أنه يوجد ببعض المناطق تضاريس جبلية تنشأ دون تشوه رئيسى فى القشرة الأرضية . فقد تتقطع بعض الهضاب plateaus - وهى مناطق صخرية عالية مستوية القمة تقريباً - إلى تضاريس وعرة تشبه الجبال بسبب بعض عوامل التعرية. وعلى الرغم من أن تلك التضاريس المرتفعة تشبه الجبال تضاريسيا ، إلا أنه ينقصها التراكيب المصاحبة لعمليات بناء الجبال . ومن أمثلة تلك الجبال أيضاً ، تلك التى تتكون نتيجة التصدع الكتلى **block-faulting** ، والتى تشمل التحرك على صدوع عادية normal faults بحيث ترتفع كتلة أو أكثر بالنسبة للمساحات المجاورة لها (شكل 5.18). وتمثل منطقة بيزن أند رينج Basin and Range Province فى غرب الولايات المتحدة مثالاً تقليديا لتكون الجبال بسبب التصدع الكتلى ، حيث شُدت الأرض فى اتجاه شرق – غرب ، وتسببت قوى شد أدت إلى تكون صدوع تحد الكتل الأرضية فى اتجاه شمال - جنوب. وقد أدت الحركة على امتداد تلك الصدوع إلى تكون كتل مرفوعة تسمى نتوقا (مفردها نتق) horsts وكتل هابطة تسمى أخاديد (مفردها أخدود) grabens . ويحد كتل النتوق والأخاديد صدوعا عادية متوازية من الجانبين. وقد أدت تعرية كتل النتوق إلى تكون الملامح الطوبوغرافية لسلاسل الجبال الحالية . وفى مصر، فقد نشأت بعض الجبال عن التصدع الكتلى فى منطقة خليج السويس.



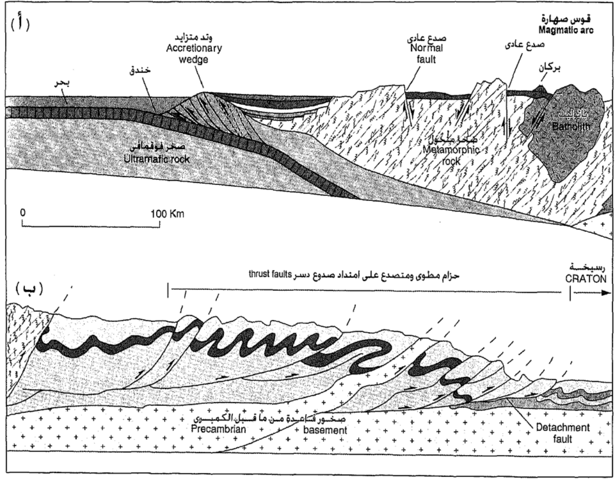
شكل (6.18):
أ) بلوتون من صخور نارية مقاومة للتعرية تداخل فى صخور رسوبية.
ب) تؤدى تعرية الصخور الرسوبية الضعيفة إلى كشف البلوتون وتكوين جبال صغيرة.
(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd eedition. West Publishing Company, Minneapolis).

كما قد تنشأ الجبال نتيجة تداخل باثوليثات مكونة من صخور بلوتونية (جوفية) مقاومة للتعرية فى القشرة الأرضية انكشفت بعد أن رفعت الصخور، وتم تعرية الصخور الرسوبية الضعيفة التى تعلوها (شكل 6.18).

أ. تراكيب الجبال

تكونت أحزمة الجبال خلال الزمن الجيولوجى المتأخر فى عديد من مناطق العالم، وهى تشمل الأحزمة الحديثة مثل الكورديليرا الأمريكية، والتى تمتد على الحافة الغربية لأمريكا من كيب هورن إلى الاسكا، وسلسلة الألب – الهيمالايا، والتى تمتد من البحر الأبيض المتوسط عبر إيران إلى شمال الهند وإندونيسيا، كذلك المناطق الجبلية فى غرب المحيط الهادئ والتى تشمل أقواس الجزر الناضجة mature island arcs مثل اليابان والفلبين وسومطرة (شكل 1.18). وقد تكونت معظم هذه الأحزمة الجبلية الحديثة خلال المائة مليون سنة الأخيرة من عمر الأرض. وقد يكون بعضها قد بدأ فى النمو، بما فيها الهيمالايا، منذ 40-50 مليون سنة مضت.

وبالإضافة إلى تلك الأحزمة الجبلية الحديثة، فإنه توجد أحزمة جبلية أخرى منذ ما قبل الكمبرى وحقب



شكل (7.18):

أ) قطاع عرضى فى حزام جبلى نموذجى. وقد رسم القليل من الطبقات الرسوبية بغرض التبسيط.

ب) امتداد لحزام الجبال إلى يمين الشكل (أ).

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

الحياة القديمة (الباليوزوى). وتحتفظ تلك الأحزمة الجبلية بالملامح التركيبية نفسها الموجودة فى أحزمة الجبال الحديثة، على الرغم من تعرضها لعوامل التعرية الشديدة. وتمثل جبال الأبالاش فى شرق الولايات المتحدة الأمريكية والأورال فى الاتحاد السوفيتى (السابق) تلك المجموعة القديمة. وتمتد فى شرق مصر سلسة جبال البحر الأحمر، والتى يرجع عمرها إلى ما قبل الكمبرى.

وعلى الرغم من أن أحزمة الجبال الرئيسية تختلف من منطقة لأخرى فى التفاصيل المميزة لكل منطقة، إلا أن كل أحزمة الجبال تتكون عموماً من حيود متوازية تقريباً من صخور رسوبية وبركانية مطوية ومتصدعة، كما أن بعض أجزائها قد تعرضت لعملية تحول شديدة بالإضافة إلى تداخل بعض الأجسام النارية الأحدث بها (شكل 7.18). وقد تكونت الصخور الرسوبية فى معظم هذه الأحزمة نتيجة تراكم رواسب بحرية عميقة يزيد سمكها فى بعض الأحيان عن 15 كيلومترا، بالإضافة إلى رواسب الرف القارى الأقل سمكا. وتكون معظم هذه الصخور الرسوبية المشوهة أقدم من عمليات بناء الجبال. وتدل تلك الظواهر، على أن هناك فترة ممتدة من الترسيب الهادئ على الحافة القارية أعقبتها سلسلة أحداث عنيفة من التشوه.

وتدل الدراسة التفصيلية للمناطق الجبلية، أن عملية بناء الجبال تستغرق وقتا طويلا وتستغرق فى بعض الأحيان أكثر من 100 مليون سنة. وعلاوة على ذلك، فإن إعادة ترتيب الأحداث توضح أن التشوه يبدأ عموماً من حافة القارة إلى الداخل، بحيث تتعرض الرواسب البحرية العميقة للتشوه أولا. وقد تعرضت تلك الرواسب، والتى تتكون من حجر رملى ردىء الفرز وفتات بركانى وطفل للطى الشديد والتصدع والتحول الشديد، كما لو أنها قد عُصرت بمنجلة عملاقة تحرك فكها من البحر فى اتجاه الأرض. ويصاحب فترة التشوه فى معظم أحزمة الجبال عمليات نشاط بركانى مع متداخلات جرانيتية.

وتشمل المرحلة التالية فى التشوه رسوبيات الماء الضحل على الرفوف القارية. وتتكون تلك الرسوبيات من الحجر الرملى والحجر الجيرى والطفل. وتتشوه تلك الطبقات بالطى وبصدوع الدسر التى تؤدى إلى انزلاق شرائح كبيرة من الصخور فوق طبقات أحدث عمرا. ويكون التحول عادة منخفض الرتبة. وتتعرض مناطق التجبل بعد فترة من انتهاء عمليات بناء الجبال إلى عملية رفع إقليمى. ويصاحب تلك العملية عادة القليل من التشوه. وعندما ترتفع الطبقات المشوهة عاليا، تتزايد عمليات التعرية مما يؤدى إلى تشكيل الطبقات المشوهة لتأخذ الشكل التضاريسى للجبال.

وقد تم خلال السنوات الماضية وضع عديد من الفرضيات لتفسير كيف تتكون أحزمة الجبال الرئيسية. وتقترح إحدى هذه الفرضيات أن الجبال عبارة عن تجعدات فى القشرة الأرضية نشأت أثناء تبرد كوكب الأرض من حالتها الأولى شبه السائلة. فعندما فقدت الأرض حرارتها فإنها انكمشت ونشأ بها التجعدات. وتشبه تلك العملية، ما يحدث من تجعدات عندما تجف حبة برتقال، ولكن هذه الفرضية لم تصمد طويلا أمام الانتقادات التى وجهت إليها.

ومع ظهور نظرية تكتونية الألواح وضع نموذج آخر لشرح عملية بناء الجبال. فطبقا لتلك النظرية فإن بناء الجبال يحدث عند حدود الألواح المتقاربة، حيث تنشأ قوى تضاعف أفقية نتيجة تصادم الألواح، مما يؤدى إلى طى وتصدع وتحول التراكمات السميكة من الرواسب المتكونة على امتداد حواف كتل الأرض. وبالإضافة إلى ذلك، يصبح الانصهار الجزئى للقشرة

المحيطية المندسة مصدراً للصهارة التى تتداخل وتشوه تلك الرواسب.

ب. عمليات بناء الجبال

تنصب معظم الدراسات التى تحاول فهم عمليات بناء الجبال على المناطق الموجود بها تراكيب جبال قديمة، بالإضافة إلى المناطق التى يُظن أن عمليات التجبل مازالت قائمة بها. وتمثل نطاقات الاندساس النشطة مناطق ذات أهمية خاصة ، حيث تتقارب أجزاء القشرة الأرضية، وتتكون أقواس بركانية عند معظم نطاقات الاندساس الحديثة. ويمثل هذا الوضع حزام التجبل الممتد حول المحيط الهادى والمعروف بالحزام حول الهادئ circum-Pacific belt . وعلى الرغم من أن نشأة القوس البركانى لا تؤدى إلى تكون طوبوغرافية الجبل ، إلا أن هذا النشاط يعتبر أحد مراحل تكون حزام جبلى رئيسى .

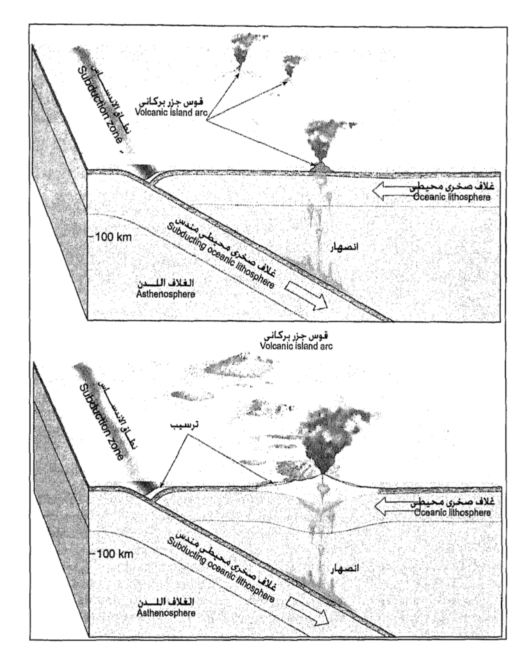
وعندما يتصادم لوحان قاريان تنشأ قوى هائلة تؤدى إلى أن تفقد الأرض صلابتها وتتشوه وتتكسر بعدة طرق . وتمتص القشرة الأرضية معظم الحركة الناشئة عن التصادم عن طريق الطى الشديد والتصدع، خلال نطاق من التشوه الشديد يمتد لمئات الكيلومترات داخل القارة . وقد يحدث التصادم أيضاً بين كتلة قارية وكتلة من القشرة الأرضية من أى نوع، بما فيها جزر أرخبيل مثل جزر الألوشى أو بعض الكتل القارية الصغيرة مثل مدغشقر. وسوف نستعرض تلك المواقع من بناء الجبال فى الأجزاء التالية.

1- بناء الجبال وأقواس الجزر: التجبل عند حدود الألواح المحيطية - المحيطية

تتكون أقواس الجزر البركانية volcanic island arcs من طراز الأليوشى .Aleultian - type عندما يتقارب لوحان محيطيان ويندس أحدهما تحت الآخر ، وتنشأ صهارات نتيجة الانصهار الجزئى للوح المندس وبعض صخور الوشاح الموجودة أعلاه. وتتصاعد تلك الصهارات لأعلى لتكوّن الجزء النارى من نظام القوس المتكون (شكل 8.18). وخلال فترة من النشاط البركانى وما يصاحبها من رفع للكتل النارية المتداخلة يزداد القوس المتكون فى الحجم والارتفاع . وتؤدى زيادة ارتفاع القوس إلى زيادة معدل التعرية ، وبالتالى زيادة كمية الرواسب التى تضاف إلى قاع البحر المجاور وإلى الحوض خلف - قوسى back-arc basin (المنطقة المحصورة بين الخندق المحيطى وقوس الجزر) .

وبالإضافة إلى الرواسب الآتية من اليابسة ، تُكشط رواسب الماء العميق من سطح اللوح المحيطى الهابط ، وتتراكم تلك الرواسب أمام اللوح العلوى الراكب ، وتكوّن ما يعرف بالوتد المتزايد accretionary wedge . وبمعنى آخر ، فإن الوتد المتزايد هو كتلة كبيرة من الرواسب الوتدية الشكل ، تتجمع فوق اللوح المحيطى المندس حيث تكشط تلك الرواسب من اللوح المحيطى المندس وتلتحم بكتلة القشرة الأرضية العلوية الراكبة. وتسبب قوى التضاغط الناشئة من الألواح المتقاربة أن يطوى الوتد المتزايد ومعه أجزاء من القشرة المحيطية التى قُصت من اللوح الهابط والمعروفة بالأوفيوليت بصورة معقدة ومقطوعة بعديد من صدوع الدسر . ويعتقد أن استمرار عملية الاندساس يؤدى إلى تكون وتد سميك من المواد المشوهة يمتد موازيا للجزء النارى من القوس وفى اتجاه البحر. وقد يؤدى النمو المستمر إلى بناء وتد متزايد يصبح فى النهاية كبيرًا لدرجة تكفى لأن يرتفع فوق مستوى سطح البحر .

وتتشوه وتتحول الرواسب الموجودة فى القوس البركانى ناحية الأرض . وقد يكون التحول فى الوتد



شكل (**8.18**) : تطور قوس جزر بركانى **volcanic island ara** عند حد محيطى - محيطى متقارب من طراز الأليوشى **Aleutian - type**.
(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

المتزايد نتيجة قوى الضغط الشديدة الناشئة من الألواح المتقاربة ، كما أن التحول قد يتم أيضاً بالقرب من القوس البركانى مصاحباً لتداخل الأجسام الصهارية الكبيرة . ولذلك ، فإن الصخور المتحولة الموجودة فى الأقواس البركانية تحتوى على معادن مميزة للتحول المرتفع الحرارة.

وتؤدى هذه الأنشطة المختلفة إلى تكون قوس جزر ناضج mature island arc يشمل حزامى تجبل متوازيين تقريباً . ويتكون الجزء المواجه لليابسة من القوس البركانى من براكين وأجسام متداخلة كبيرة مختلطة مع صخور متحولة عند درجات حرارة مرتفعة. أما الحزام المواجه للبحر من القوس البركانى فهو الوتد

المتزايد وهو يتكون من رواسب متحولة ومطوية ومتصدعة وفتات بركانى ، وتحتوى على معادن تميز التحول بالضغط المرتفع مثل معدن الجلوكوفين .

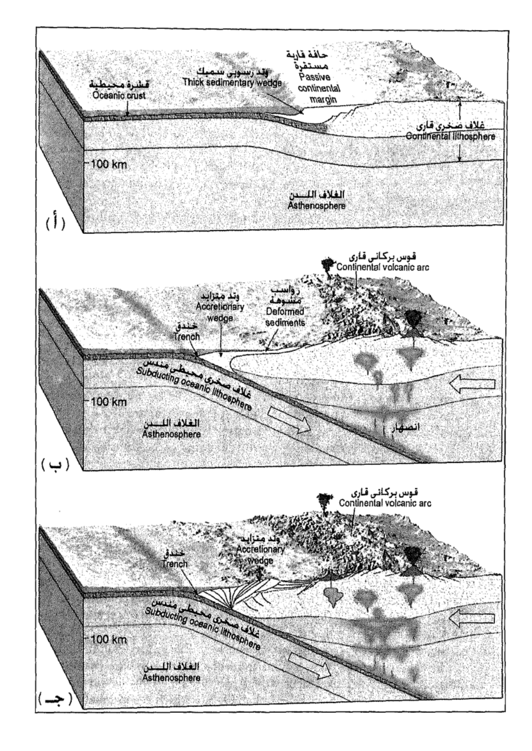
وقد تحقق الجيولوجيون حديثاً من أهمية أقواس الجزر فى عملية بناء الجبال . وهناك الآن اتفاق عام على أن العمليات التى تحدث فى أقواس الجزر الحديثة تمثل إحدى مراحل تكون أحزمة الجبال الرئيسية على الأرض . وحيث إن أقواس الجزر تُحمَل بواسطة الألواح المحيطية المتحركة ، فإنه من الممكن أن يصطدم قوسان ويلتحما ببعضهما (تعرف عملية الالتحام بالدرز **suturing**) ليكونا كتلة كبيرة من القشرة الأرضية . كما تنمو وتزداد أقواس الجزر لتصل إلى كتل فى حجم القارات ، وتشارك تلك الكتل فى تكوين حزام جبلى ، مثل حزام جبال الأبالاش .

2- بناء الجبال على امتداد الحواف القارية: التجبل عند حدود الألواح المحيطية - القارية

تتضمن عملية بناء الجبال على الحواف القارية تقارب لوح محيطى مع لوح آخر تشتمل مقدمته على قشرة قارية مثل جبال الألب فى أوروبا وجبال الأنديز فى غرب أمريكا الجنوبية . وتشمل منظومات جبال الإنديز على أعلى قمم جبلية فى الأمريكتين ، حيث وصل عديد من تلك القمم إلى ارتفاع يزيد عن 6000 متر. ويضم الإنديز أيضاً براكين نشطة ، بالإضافة إلى أن الجزء الغربى من أمريكا الجنوبية هو جزء نشيط للغاية من حزام الزلازل حول المحيط الهادئ . وعلاوة على ذلك ، يعتبر خندق بيرو- شيلى الذى يقع عند الساحل الغربى لأمريكا الجنوبية أحد أكبر الخنادق المحيطية على الأرض . ويسبب هذا النوع من التقارب المحيطى- القارى تراكيب تشبه تلك الموجودة أثناء نمو وتكون قوس جزر بركانى .

وتبدأ المرحلة الأولى فى تكون حزام جبلى طراز- الانديزى Andean type قبل تكون نطاق الإندساس. فخلال تلك الفترة فإن حافة القارة تكون حافة مستقرة margin passive . بمعنى أن الكتلة القارية توجد داخل اللوح بعيداً عن حافة اللوح . وتعتبر الكتلة القارية جزءاً من اللوح نفسه ، مثلها مثل القشرة المحيطية المجاورة . ويمثل اليوم الساحل الشرقى للولايات المتحدة الأمريكية والحافة الغربية لأفريقيا مثالاً لحافة قارية مستقرة ، حيث تتراكم عند تلك الحافة المستقرة ، رواسب رف قارى تكوّن فى النهاية وتدا سميكا من رواسب الماء الضحل والمكونة من الحجر الرملى والحجر الجيرى والطفل (شكل 9.18أ) ، وترسب تيارات العكر خلف الرف القارى رواسب العكر turbidites على المنحدر والمرتفع القارى . وعند نقطة معينة ، تصبح الحافة القارية نشطة ويتكون نطاق اندساس ، وتبدأ عملية التشوه (شكل 9.18ب) . ويعتبر الشاطئ الغربى لأمريكا الجنوبية مثالا جيدا لتلك الحافة القارية النشطة . فعندما بدأت القارة العظمى **بانجيا Pangaea** منذ 200 مليون سنة فى التكسر نتيجة للخسف على امتداد ما نعرفه اليوم بحيود وسط الأطلنطى ، تحرك لوح أمريكا الجنوبية ناحية الغرب بعد انفصاله عن أفريقيا ، بينما بدأ اللوح المحيطى المجاور للساحل الغربى لأمريكا الجنوبية (لوح نازكا) فى الانحناء والاندساس تحت القارة، على امتداد خندق بيرو- شيلى (شكل 17. 16). وقد تغيرت الحافة القارية من حافة مستقرة إلى حافة قارية نشطة.

ويؤدى تقارب الكتلة القارية واندساس اللوح المحيطى إلى تشوه وتحول الحافة القارية. وبمجرد هبوط اللوح المحيطى إلى حوالى 100 كم ، تصعد الصهارة الناتجة عن الانصهار الجزئى وتتداخل فى الطبقات التى تعلوها ، كما أنها تؤدى إلى تشوه تلك الطبقات (شكل



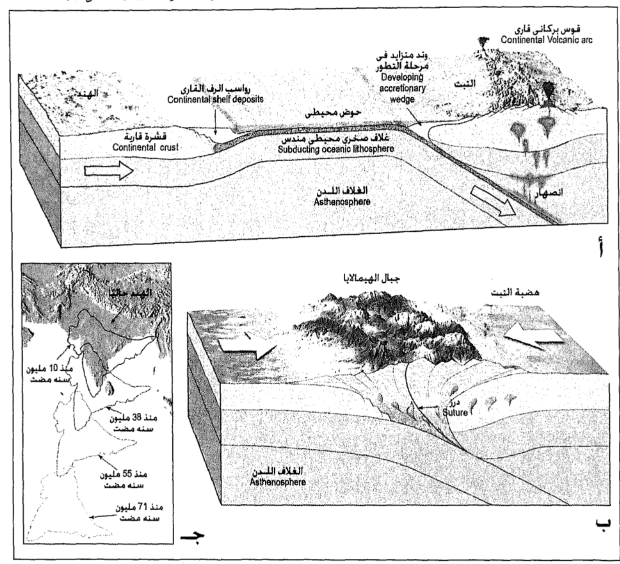
شكل (**9.18**): تجبل على امتداد نطاق اندساس من طراز الأنديزى **Andean-type**

أ) حافة قارية مستقرة يغطيها وتد سميك من الرواسب

ب) تقارب ألواح ينشأ عنه نطاق اندساس ، وانصهار جزئى ينشأ عنه نمو قوس بركانى قارى .

جـ) استمرار التقارب والنشاط النارى يؤدى لاحقا إلى تشوه وزيادة سمك القشرة ، مما يؤدى إلى رفع أحزمة الجبال ونمو الوتد المتنامى accretion wedge.

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).



شكل (10.18): هجرة الهند إلى الشمال واصطدامها بلوح أوروأسيا

أ) ألواح متقاربة يتكون بينها نطاق اندساس ، حيث يحدث انصهار جزئى للوح المحيطى المندس ويتكون قوس بركانى . أما الرواسب التى كشطت من اللوح المندس فقد أضيفت إلى الوتد المتزايد (المتنامى) accretionary wede .

ب) وأخيرا تصادمت الكتلتان ، وحدث التشوه ورُفع الوتد المتزايد (المتنامى) ورواسب الرف القارى ، كما دفعت أجزاء من قشرة الهند فوق اللوح الهندى .

جـ) وضع الهند بالنسبة للوح أوروأسيا فى مختلف الأزمنة .

(After Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York).

9.18 ب). وتلتحم الرواسب الآتية من اليابسة وتلك التى كشطت من اللوح المندس بجانب الكتلة القارية على امتداد الخندق أثناء تكون القوس البركانى volcanic arc. ويطلق مصطلح وتد متزايد accretionary wedge على هذا التراكم من الصخور الرسوبية والمتحولة مع بعض الأجزاء التى كشطت من القشرة المحيطية والوشاح والمسماة بالأوفيوليت، (شكل 9.18 ب). وقد يؤدى استمرار وامتداد عملية الاندساس إلى بناء وتد متزايد كبير لدرجة أنه يبرز فوق مستوى سطح البحر (شكل 9.18 ج).

وتتكون أحزمة الجبال طراز– الأنديزى ، مثلها مثل أقواس الجزر الناضجة ، من نطاقين متوازيين تقريباً. النطاق الأول ويشمل الجزء الواقع ناحية اليابسة ، ويحتوى على القوس البركانى المكون من البراكين الأنديزيتية وأجسام متداخلة فلسية كبيرة مختلطة مع صخور متحولة عند درجات حرارة عالية . أما الحزام الواقع ناحية البحر من القوس البركانى فهو الوتد المتزايد والمتكون من رسوبيات وفتات بركانى مطوى ومتصدع ومتحول .

ويوجد مثال آخر على أحزمة التجبل طراز– الأنديزى من الصحراء الشرقية المصرية ، وتشمل سلسلة الجبال الممتدة موازية للبحر الأحمر تقريبا . وقد تكوّن ذلك الحزام الجبلى نتيجة اندساس لوح محيطى تحت الحافة الغربية للوح أفريقيا القارى (شكل 26.17).

3- بناء الجبال نتيجة التصادم القارى: التجبل عند حدود الألواح القارية - القارية

ناقشنا فى الجزء السابق تكون أحزمة الجبال عندما تشمل الحافة المتقدمة لأحد الألواح المتقاربة قشرة قارية. ومع ذلك ، فمن الممكن أن يحمل كل من اللوحين المتصادمين قشرة قارية . ونظراً لكون الغلاف الصخرى للقارات أخف من أن يغوص ويندس، فإن التصادم يحدث فى النهاية بين الكتلتين القاريتين . وجدير بالملاحظة أن قوى التصادم بين الكتل القارية تكون كبيرة لدرجة أن القشرة القارية تفقد صلابتها وتتشوه وتتكسر بعده طرق . وتمتص القشرة القارية معظم حركة التصادم عن طريق الطى الشديد والتصدع فى نطاق تشوه شديد يمتد مئات الكيلومترات فى القارة . ويسبب التصدع فى تكسر القشرة إلى عديد من فرش الدسر **thrust sheets** يصل سمكها إلى حوالى 20كم ، تتكدس فوق بعضها البعض على امتداد أسطح صدوع الدسر شبه الأفقية . كما تتشوه غالبا فرش الدسر نفسها وتتعرض للتحول ، كما تنتزع رواسب الرف القارى الوتدية من صخور القاعدة التى ترسبت عليها وتدفع على أسطح الدسر داخل الأرض . ويوضح شكل (10.18) مثالا لبناء الجبال نتيجة التصادم القارى عندما اصطدمت الهند مع آسيا منذ 40–50 مليون سنة. وقد انفصلت الهند عن القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) قبل هذا الوقت ، والتى كانت جزءاً منها ثم تحركت عدة آلاف من الكيلومترات ناحية الشمال قبل أن يحدث التصادم (شكل 10.18) . وقد تكونت جبال الهيمالايا ومرتفعات التبت نتيجة هذا التصادم .

وعلى الرغم من أن معظم القشرة المحيطية التى كانت تفصل الهند عن آسيا قبل التصادم قد اندست ، إلا أن بعضها قد ضغط مع الرسوبيات البحرية . ويمكن أن تتواجد الآن تلك المواد مرتفعة عاليا فوق مستوى سطح البحر. ويعتقد أن اللوح المحيطى المندس قد انفصل عن اللوح القارى الصلب واستمر فى مساره تحت الكتلة القارية بعد هذا التصادم .

ويُعتقد أن مركز الانتشار الذى دفع الهند إلى الشمال مازال نشيطاً ، وأنها لازالت مستمرة فى تحركها ناحية آسيا . وقد قطعت الهند منذ تصادمها مع آسيا حوالى 2000 كم فى آسيا على امتداد صدوع دسر . وتتحرك الهند حاليا نحو الشمال بمعدل حوالى 5 سم كل عام. ويدل عديد من الزلازل الشديدة المسجلة فى الصين ومنغوليا على هذا التحرك .

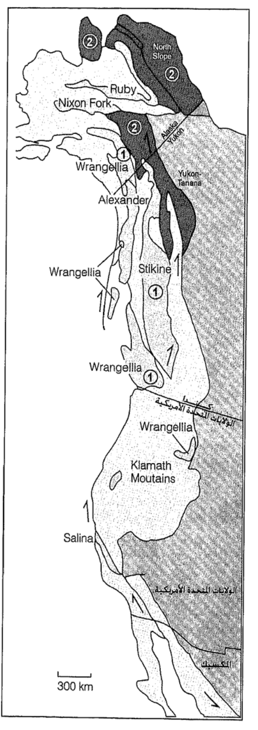
ويعتقد أنه حدث تصادم مشابه ، ولكنه أقدم كثيراً ، حينما اصطدمت القارة الأوروبية مع قارة آسيا لتتكون جبال الأورالUral Mountains التي تمتد في اتجاه شمالي - جنوبي في الاتحاد السوفيتي السابق . وقبل ظهور نظرية تكتونية الألواح ، وجد الجيولوجيون صعوبة في تفسير وجود سلاسل جبال داخل القارات ، وكيف يمكن أن تترسب آلاف الأمتار من الرواسب البحرية وتتشوه كثيرا في وسط كتلة قارية كبيرة.

وهناك أحزمة جبال أخرى يظهر أنها تكونت نتيجة تصادمات قارية مثل جبال الألب والأبالاش . ويعتقد أن جبال الألب قد تكونت نتيجة تصادم بين أفريقيا وأوروبا عند غلق البحر التيثيز Tethys Sea. كما يوجد أيضاً اللوح العربي في غرب جبال الهيمالايا الذي يتصادم مع آسيا على امتداد سلسلة جبال زاجروسZagros Mountains في إيران.

4- بناء الجبال وتكتونية الألواح الصغيرة

أوضحت نظرية تكتونية الألواح عند بداية ظهورها أن هناك ميكانيكيتين لتفسير نشأة الجبال (التجبل) ، الأولى وهي التصادمات القارية التي اقترحت لشرح بعض منظومات الجبال مثل الألب والهيمالايا والأبالاش والأورال . أما الثانية فهي نشأة الجبال المصاحبة لاندساس لوح محيطي ، مثل منظومة جبال الأنديز ، والتي كان يعتقد أنها سبب نشأة عديد من منظومات الجبال حول المحيط الهادئ .

وقد أوضحت البحوث الحديثة أن هناك ميكانيكية أخرى لشرح نشأة الجبال . فقد اكتشف الجيولوجيون خلال الفترة من عام 1970م وحتى عام 1980م أن هناك أجزاء عديدة من المنظومات الجبلية تتكون من كتل ملتحمة صغيرة (تمتد لمئات الكيلومترات) من الغلاف الصخري ، يدل تاريخها الجيولوجي على أنها مختلفة عن الكتل المحيطة ، تعرف بكتل الألواح الصغيرة **microplate terranes** . وتختلف تلك



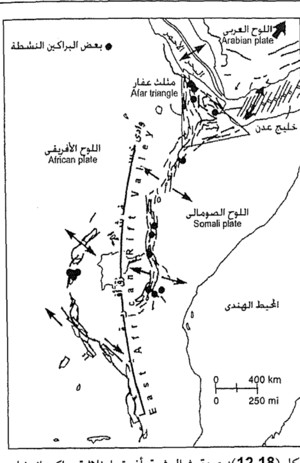
شكل (**11.18**): بعض كتل الغلاف الصخرى الملتحمة والمسماة بالألواح الصغيرة microplates ، والتى تكون الحافة الغربية لأمريكا الشمالية . ومن المحتمل أن بعض الكتل (موضحة بالرقم 1) قد نشأت كأجزاء من قارات غير قارة أمريكا الشمالية ، بينما انزاحت بعض الكتل الأخرى (موضحة بالرقم 2) كأجزاء من قارة أمريكا الشمالية نفسها .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd eedition. West Publishing Company, Minneapolis).

الكتل تماماً فى محتواها الحفرى والاتجاهات التركيبية وخصائص المغناطيسية القديمة عن صخور منظومة الجبال المحيطة. وقد دفع هذا الاختلاف كثيرا من الجيولوجيين للاعتقاد أن تلك الكتل تكونت فى مكان آخر ثم حملت لمسافات كبيرة كأجزاء من ألواح أخرى حتى اصطدمت مع ألواح صغيرة أخرى أو قارات. ولذلك تعرف أحيانا تلك الألواح الصغيرة بالكتل المزاحة displaced terranes أو الكتل الدخيلة exotic terranes . ويجب ألا نخلط بين مصطلح terrane وكلمة terrain والتى تعنى منطقة أو تضاريس أرض ما .

وتشير الأدلة الجيولوجية أن أكثر من 25 ٪ من ساحل المحيط الهادئ الممتد غرب أمريكا الشمالية من ألاسكا إلى باها بكاليفورنيا يتكون من ألواح صغيرة ملتحمة. وتتكون الألواح الصغيرة المتزايدة من أقواس جزر بركانية وحيود محيطية وجبال بحرية وكتل صغيرة من القارات ، والتى كشطت ولحمت فى حافة القارة أثناء اندساس اللوح المحيطى الذى حملها تحت القارة . ويقدر أنه أضيف أكثر من 100 لوح صغير مختلفة الأحجام إلى الحافة الغربية لأمريكا الشمالية خلال المائتى مليون سنة الماضية (شكل 11.18) .

وتوجد معظم الألواح الصغيرة المعروفة فى سلاسل جبال المنطقة الساحلية للمحيط الهادئ- أمريكا الشمالية ، إلا أنه يعتقد أنه يوجد عدد من تلك الألواح الصغيرة فى السلاسل الجبلية الأخرى أيضاً ، ولكن ليس من السهل تعرف تلك الألواح الصغيرة فى المنظومات الجبلية الأقدم ، مثل الأبالاش ، بسبب التشوه والتعرية الشديدة . ومع ذلك ، فقد تم تمييز حوالى 12 لوحا صغيراً فى الأبالاش ، إلا أنه من الصعوبة بمكان تعيين حدودها . وتقدم تكتونية الألواح الصغيرة نظرية جديدة للأرض تساعد فى فهم التاريخ الجيولوجى للقارات.



شكل (12.18): يتمزق شمال شرق أفريقيا بثلاثة مراكز انتشار ، تلتقى فى اتصال ثلاثى الأذرع triple junction فى مثلث عفار .
(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

ولكن ما طبيعة تلك الأجزاء الصغيرة من الغلاف الصخرى ، وأين نشأت؟ ويعتقد بعض الباحثين أن بعض تلك الكتل قد تكون عبارة عن قارات صغيرة مشابهة فى طبيعتها لجزيرة مدغشقر الحالية . وقد يكون بعضها عبارة عن أقواس جزر ، مثل اليابان والفلبين وجزر الألوشى ، والتى تمتد حاليا فى المحيط الهادى . وبالإضافة إلى ذلك ، فقد يوجد البعض الآخر تحت مستوى سطح البحر ، وتمثلها حاليا الأرصفة المغمورة، والتى ترتفع عاليا فوق سطح الماء على الناحية الغربية من المحيط الهادى .

وتقترح أكثر وجهات النظر قبولا اليوم ، أن الألواح المحيطية تتحرك حاملة أقواس الجزر والقارات الصغيرة إلى نطاق اندساس ، حيث تُكشط الأجزاء

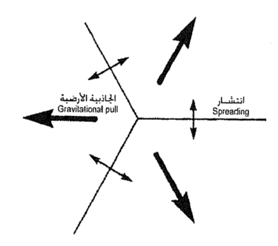
العليا السميكة من اللوح الهابط وتُدفع على امتداد صدوع دسر thrust fault على هيئة فرش رقيقة نسبيا فوق كتلة القارة المجاورة . وتزيد هذه المادة التى أضيفت حديثا من عرض القارة ، وقد تتراكب فوق كتلة القارة ، وتزاح داخل القارة إذا حدث تصادم بكتل أخرى إضافية . وعلاوة على ذلك ، فإن هناك أجزاء من القشرة القارية تزاح باستمرار على امتداد صدوع ناقلة transform faults ، حيث يمكن أن تصطدم وتتلاحم بكتل الغلاف الصخرى الأخرى . ومثال على تلك العملية ، ما يحدث فى غرب لوح أمريكا الشمالية ، حيث يزاح جزء من كاليفورنيا وشبه جزيرة باها فى اتجاه شمال-غرب على امتداد صدع سان أندرياس ، ومع مرور وقت كاف ، قد تلتحم تلك القشرة القارية بألاسكا .

IV. خسف القارات

تتسبب قوى تكتونية الألواح فى تغيير القشرة المافية (البازلتية) الرقيقة تحت قيعان المحيطات ، وكذلك القشرة الفلسية السميكة للقارات . وكما ذكرنا فى فصل تكتونية الألواح ، فإن نطاقات الانتشار spreading zones تتواجد غالبا فى منتصف أحواض المحيطات ، حيث يتكون النطاق الصخرى المحيطى وينتشر فى كل من الجانبين على امتداد حيود وسط المحيط . وبالمثل ، فإن القشرة القارية يمكن أن تنفصل إلى أجزاء ، حيث يتكون محيط جديد بين الجزئين القاريين المتبقيين . والقشرة القارية لاتتكسر إلى أجزاء بسهولة ، حيث إن سمكها يبلغ خمسة أمثال القشرة المحيطية . وفى الحقيقة فإن الخسف يبدأ فى التكون بكسر القارة . وتقدم قارة أفريقيا والبحار المجاورة لها مثالا جيدا على الخسف القارى ، والذى مازال فى طور التكوين حتى الآن .

أ. الخسف ثلاثى الأذرع والنقاط الساخنة

توجد على حافة قارة أفريقيا منظومة من وديان الخسف rift valleys تكونت خلال حقب الحياة الحديثة ، وتمتد جنوبا من البحر الأحمر وخليج عدن عبر القارة الأفريقية (شكل 12.18). ووديان الخسف والأحواض الكبيرة التى يشغلها البحر الأحمر وخليج عدن هى أخاديد grabens تكونت نتيجة شد وكسر القشرة القارية. ووادى الخسف **rift valley** هو منخفض ضيق وطويل يحده من كل جانب صدع واحد أو أكثر من الصدوع العادية normal faults. وينشأ وادى الخسف عن قوى شد ، حيث يبدو أن كتلة قد سقطت بين كتلتين شدتا من جانبيهما (شكل 17. 23). وعندما تتكون نطاقات الخسف ، فإنها تبدأ غالبا عند حدود اللوح كأنها أخاديد لها ثلاثة أذرع تعرف بالملتقى الثلاثى triple junction (شكل 13.18) . وقد لاحظ الجيولوجيون قبل ظهور نظرية تكتونية الألواح أن القشرة القارية عند **الأخاديد ثلاثية الأذرع three armed grabens** ترتفع وتتحدب على هيئة قباب . ويبدو أن هذا التقبب ، وفى ضوء نظرية تكتونية



شكل (13.18): شكل توضيحى للاتصال ثلاثى الأذرع triple junction والمكون من ثلاثة مراكز انتشار حديثة حيث تتركز الحرارة فى الوشاح وتصعد لأعلى فى هيئة بلوم صهارى، مما يؤدى إلى تحدب وتقبب الغلاف الصخرى فوقها وتكسره إلى نظام شعاعى مكون من ثلاثة أذرع يشغل كل منها خسيفا rift . وتعمل الجاذبية الأرضية على تمزيق القبة وبدء عملية انتشار فى كل خسيف .

(After Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston).

الألواح، يعكس وجود نقطة ساخنةhot spot . وعند مثلث عفار Afar Triangle بجيبوتى يمثل البحر الأحمر وخليج عدن والنهاية الشمالية لوديان الخسف الأفريقية ملتقى ثلاثى (شكل 12.18) . وتتواجد هذه الملتقيات كمعالم شائعة فى القشرة الأرضية ، حيث يتواجد أكثر من نوع من حدود الألواح عند الملتقى الثلاثى .

ويستمر الخسف عادة فى ذراعين من أذرع الخسف ثلاثى الأذرع ، بينما يصبح الذراع الثالث خسيفًا خاملاً failed rift . وقبل أن يتوقف النشاط على امتداد هذا الذراع الخاملاً ، فإنه يكوّن أخدودا أو منظومة من الأخاديد تمتد داخل اليابسة من حافة القارة الجديدة التى كوّنها الذراعان الآخران . ويصبح الذراع الثالث (أو الخامل) منخفضا وممتلئا بالرواسب، كما يصبح مستقرا تدريجيا ويدفن وتنساب به بعض الأنهار الكبيرة، مثل المسيسيبى والراين والأمازون . وقد أطلق عليه الجيولوجيون الروس مصطلح **أولاكوجين aulacogen** . وتحتوى عادة منخفضات الأولاكوجين على موارد بترولية هامة نتيجة التراكم السريع للرواسب السميكة التى تحتوى على رواسب غنية بالمواد العضوية ، وقد تتكون أيضاً بعض رواسب الخامات فى الأماكن التى تصعد فيها المحاليل الساخنة على امتداد الصدوع التى تحد تلك المنخفضات.

ب - المعالم الجيولوجية لوديان الخسف القارية

يتكون كل وادى خسف من كتلة أرضية طولية ضيقة انخفضت نتيجة التصدع . ويستطيل وادى الخسف ويزيد فى العمق بسبب استمرار عملية الانتشار والشد حتى يصل فى النهاية إلى المحيط . وفى هذه الحالة فان الوادى يصبح بحرا ضيقا وطويلا مع وجود مخرج إلى المحيط ، كما هو الحال فى البحر الأحمر (شكل 10. 23). ويستمر نطاق الخسف كموضع للنشاط النارى ، حيث تنشأ باستمرار قشرة محيطية جديدة على قاع حوض محيطى يتسع باستمرار (شكل 17. 23) .

وتمثل وديان الخسف فى شرق أفريقيا المرحلة الابتدائية فى تكسر قارة . كما تضم وديان الخسف بحيرات كبيرة مثل بحيرة تنجانيقا . ويصاحب وديان الخسف براكين مافية ربما صعدت من الوشاح . وتمثل الجبال البركانية الكبيرة مثل جبل كليمنجارو Kilmanjaro وجبل كينيا Mount Kenya النشاط البركانى الكبير الذى يعتقد أنه يصاحب الخسف القارى. ولم تنشأ وديان الخسف إلا منذ حين الميوسين المبكر (أقل من 20 مليون سنة مضت). وإذا استمر نشاط وديان الخسف فى أفريقيا فإن شرق أفريقيا سينفصل فى النهاية من كتلة القارة الرئيسية بنفس الطريقة التى انفصلت بها شبه الجزيرة العربية منذ 25 مليون سنة. ومع ذلك ، فليس بالضرورة أن تكون كل وديان الخسف مراكز انتشار كاملة حتى النهاية . ولم يعرف السبب بعد فى استمرار نشاط بعض وديان الخسف حتى النهاية ، وتوقف بعضها فى مراحل معينة.

V - الحواف المستقرة للقارات

عندما يستمر الخسف القارى دون توقف ، فإن القارة تنقسم إلى كتلتين ، ويتكون محيط ضيق بينهما . وتتحرك فى النهاية الحافتان القاريتان الجديدتان بعيدا عن نطاق الانتشار . وتُغمر تلك الحواف بالبحار الضحلة نتيجة الحركة الأفقية الجانبية بعيدا عن محور حيود وسط المحيط ، ولأسفل على منحدر سطح الغلاف اللدن (الأستثينوسفير) إلى مناطق ينخفض فيها السريان الحراريheat flow . وهكذا فإن حدود القارات التى كانت نشطة تكتونيا حينما كانت قريبة إلى نطاق الانتشار ، أصبحت حدودا غير نشطة أى حواف مستقرة ، وعندما تهبط تلك المساحات من القشرة القارية غير النشطة تكتونيا تحت مستوى سطح البحر ،

وتتراكم الرواسب على امتداد الرفوف القارية الضحلة. وتمثل الحدود الغربية للوح الأفريقي مثالا للحافة القارية المستقرة .

وتعرف الحواف المستقرة **passive margins** للقارات بأنها الحواف التى توجد داخل اللوح بعيدا عن حافته ، حيث تعتبر الكتلة القارية جزءا من اللوح نفسه ، مثل القشرة المحيطية المجاورة . وتسمى تلك الحواف بالمستقرة أى الهادئة ، حيث لا يوجد نشاط بركانى، كما تكون الزلازل قليلة ومتباعدة . وعلى العكس من ذلك ، فإن الحواف النشطة **active margins** تكون مصاحبة لنطاقات اندساس وصدوع ناقلة ، مما يعطى لتلك الحواف القارية الضيقة والمشوهة تكتونيا اسمها . كما تعتبر الحواف النشطة مواضع لنشأة الجبال .

وهكذا ، فقد هاجرت حواف الأطلنطى المتاخمة للولايات المتحدة والمتكونة حديثا بعيدا عن أفريقيا بعد أن تكسرت قارة البانجيا Pangea مبكرا فى حقب الحياة الوسطى (الميزوزوى) ، كما أخذت الرواسب فى التراكم لتصل إلى سمك كبير. وقد استمرت تلك الحافة المستقرة فى الهبوط تحت وزن الرواسب المضافة ، لتفسح المجال لرواسب أخرى يمكن إضافتها .

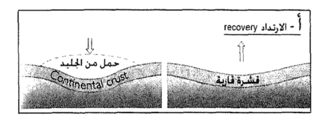
VI - الحركات الرأسية الإقليمية

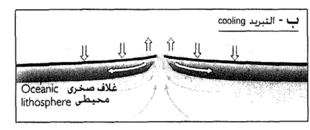
تركزت مناقشتنا لحركات القشرة الأرضية على التجبل (بناء الجبال) الذى ينشأ نتيجة لتصادم الألواح. ويتضمن التشوه نتيجة التضاغط بالطى والتصدع بالدسر وتداخل الصهارة والبركنة والتحول . ومع ذلك ففى جميع أنحاء العالم ، تسجل تتابعات الصخور الرسوبية نوعا آخر من التاريخ الجيولوجى هو الحركات البطيئة والتدريجية للقشرة الأرضية لأعلى ولأسفل دون تعرض تلك الصخور لتشوه ملحوظ ، وتعرف تلك الحركات بالإبيروجينى **epeirogeny** .

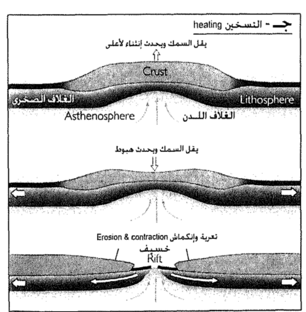
وعلى الرغم من ارتباط عديد من الحركات الرأسية بالتجبل ، إلا أن الحركات الإبيروجينية تكون بطيئة ومتقطعة وتؤثر عادة على مساحات شاسعة ، أى أن تأثيرها إقليمى ، ولا تتعرض فيها الصخور لعمليات طى أو تصدع شديد . وهناك شواهد عديدة تدل على حدوث عملية الهبوط البطىء والمستمر للقشرة الأرضية أثناء عملية الترسيب ؛ فالحفريات النباتية الموجودة فى رواسب الفحم والتى نجدها الآن فى المناجم فى عمق الأرض تدلنا على أن الأشجار قد نمت فى الأزمنة الجيولوجية السابقة فوق سطح الأرض وهى الآن مدفونة . كما تقدم التتابعات السميكة من الرواسب التى تراكمت على قاع البحر ودفنت لمئات أو آلاف الأمتار تحت قاع البحر الدليل على أن تلك الرواسب قد ارتفعت مئات أو آلاف الأمتار فوق سطح البحر حيث نجدها الآن . ويعزى رفع تلك الرواسب إلى الوضع الحالى فوق سطح البحر إلى الارتفاع البطىء دون حدوث أى تشوه للرواسب .

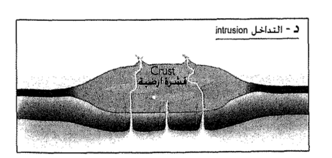
ولا يستطيع الجيولوجيون حتى الآن تقديم تفسير شامل لمعظم الحركات البطيئة والإقليمية الإبيروجينية ، ولكن وضعت بعض الفرضيات لشرح بعض تلك الحركات (شكل 14.18) ، حيث يمثل رفع فنلندا وإسكندنافيا وشواطئ شمال كندا المرفوعة عملية استعادة القشرة الأرضية لوضعها الأصلى ببطء بعد إزالة الحمل الجليدى الذى تسبب فى انخفاضها (شكل 14.18 أ). ويعتقد أن الأحواض العميقة على جانبى حيود وسط المحيط ترجع إلى تبرد وانكماش اللوح المحيطى الجديد (شكل 14.18 ب) . وقد يتسبب تسخين الغلاف الصخرى من أسفل فى دفعه لأعلى وتقليل سمكه (شكل 14.18 ج) . وقد تؤدى بعض حركات الوشاح إلى شد الغلاف الصخرى الموجود أعلاه وجعله أكثر رقة دون كسر اللوح . وقد يفسر

ذلك هبوط بعض الأحواض في القارات. وقد يؤدي استمرار الشد وحدوث خسف إلى تكون كتلتين قاريتين يفصل بينهما محيط في طور التكوين. ويدل تكون الأحواض المتلئة بالرواسب على الحواف القارية (مثل تلك الموجودة على الشواطئ شرق الأمريكتين والشواطئ الغربية لأوربا وأفريقيا) في هبوط حافة القارة بعد الخسف. ويرجع هذا الهبوط إلى انكماش القشرة أثناء تبرد الحواف وتعريتها أثناء تراجعها من الخسف. كما قد يؤدي تداخل الصهارة إلى زيادة سمك القشرة القارية ويسبب رفعها إلى أعلى (شكل 14.18 د).









شكل (14.18): بعض الميكانيكيات الافتراضية لتفسير الحركة الرأسية (لا يوجد مقياس رسم)

أ) يؤدي حمل جليد المثلجة glacier إلى تقعر القشرة الأرضية، بينما يرتفع القاع ببطء عند إزالة الجليد.

ب) يتكون الغلاف الصخري المحيطي عند حيود وسط المحيط mid - ocean ridge، ثم ترتفع قمة الحيد ويهبط قاع البحر عندما يبرد اللوح ويتقلص.

ج) يرق الغلاف الصخري القاري وينثني لأعلى بسبب التسخين، كما قد يرق الغلاف الصخري القاري بسبب تمدده ومطه عندما يندس، ويتكون حوض ترسيبي فوق القارة، فإذا تصدع اللوح الصخري القاري تكونت قارتان وينشأ بينهما محيط يأخذ في النمو التدريجي. وتتآكل حواف القارات المتراجعة بسبب التعرية من أعلى، بينما تبرد وتتقلص لتكون حواف قارية مغمورة.

د) قد يؤدي تداخل الصهارة magma إلى زيادة سمك القشرة الأرضية ويسبب رفعها إلى أعلى.

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

ولا تقتصر الحركة الرأسية الأقليمية على الأزمنة الجيولوجية الماضية فحسب ، بل لازالت تعمل حتى الآن مثل بقية الحركات التكتونية الأخرى ؛ فمدينة فينسيا تهبط حاليا ببطىء فى البحر الإدرياتيكى بمعدل حوالى 4 مم كل عام . ويرجع السبب الرئيسى لعملية الهبوط إلى أسباب تكتونية ، بالإضافة إلى أن سحب الماء والغاز الطبيعى من الرواسب قد عجّل فى عملية الهبوط. ورغم توقف عملية سحب الغاز والماء فى فينسيا ، إلا أن الهبوط التكتونى مازال مستمراً.

الملخص

1. يمكن تقسيم القشرة القارية فى معظم القارات إلى مناطق تشوهت خلال العصور الجيولوجية المختلفة. فتوجد داخل معظم القارات صخور مسطحة تقريباً تمتد لمساحات شاسعة ومستقرة تكتونياً منذ تشوهها فى ما قبل الكمبرى ، تعرف بالرسيخات ، كما تعرف المناطق المنكشفة من الرسيخات بالدروع. ويوجد خارج هذه المناطق القديمة أحزمة جبال نشيطة ، أحدث عمراً ، تكونت نتيجة تشوهات مرتبطة بحركات الألواح التكتونية.
2. تتكون الجبال عموماً بعدة طرق ، حيث يوجد فى بعضها طى وتصدع ، بينما لا يوجد فى البعض الآخر أى تشوهات ملحوظة . وتتكون أنظمة الجبال من عدة مدود جبلية تنتج من التشوه المرتبط بحركة الألواح.
3. تشمل عملية بناء الجبال والمعروفة بالتجبل الطى والتصدع والنشاط النارى والتحول . وتحدث معظم عمليات بناء الجبال حينما تتقارب الألواح ويندس لوح تحت آخر أو عندما يصطدم لوحان قاريان.
4. تتميز عمليات بناء الجبال التى تقع عند حدود الألواح المحيطية – المحيطية ، بوجود قوس جزر بركانى من طراز الأليوشى وتشوه ونشاط نارى وتحول للصخور. ويؤدى تراكم الرواسب أمام اللوح الراكب إلى تكون وتد متزايد يلتحم بكتلة القشرة الأرضية العلوية الراكبة . وتؤدى عملية الاندساس المستمرة إلى تكون قوس جزر ناضج يشمل حزامى تجبل متوازيين تقريباً: حزام تجبل يضم البراكين والأجسام المتداخلة الكبيرة المختلطة مع الصخور المتحولة مواجه للأرض ، وحزام آخر مواجه للبحر يشمل الوتد المتنامى.
5. يؤدى اندساس لوح محيطى تحت لوح قارى إلى بناء الجبال أيضاً ، مثل جبال الألب فى أوروبا وجبال الأنديز فى غرب أمريكا الجنوبية . وتعرف مثل تلك الأحزمة بأنها أحزمة جبال – طراز الأنديز. ويؤدى استمرار عملية الاندساس إلى تكون نطاقين متوازيين تقريباً من أحزمة الجبال: الأول ويشمل القوس البركانى المتكون من البراكين الأنديزيتية ومتداخلات جرانيتية كبيرة تحت القوس البركانى وصخور متحولة ، أما الحزام الواقع فى مواجهة البحر من القوس البركانى فيشمل الوتد المتزايد .
6. توجد بعض منظومات الجبال ، مثل جبال الهيمالايا وجبال الأورال ، داخل القارات بعيداً عن حدود الألواح الحالية ، وهى تتكون عندما يصطدم لوحان قاريان ببعضهما ويلتحمان .
7. تحقق الجيولوجيون الآن من أن بناء الجبال يحدث أيضاً عندما يصطدم لوح صغير بقارة ، مثل بعض كتل الغلاف الصخرى الملتحمة بالحافة الغربية لأمريكا الشمالية .

8. تنمو القارات نتيجة تتابع من عمليات بناء الجبال ، على امتداد زمن جيولوجى طويل وبعدة طرق منها الترسيب وبناء الأرصفة القارية وإضافة الباثوليثات والصخور البركانية المتكونة نتيجة الانصهار فى الوشاح على امتداد نطاقات الاندساس والتحام الألواح الصغيرة.

9. عندما توجد بقايا من قشرة محيطية والمسماة بالأوفيوليت ، داخل قارة حديثة ، فإن تلك البقايا تحدد مكان محيط قديم اختفى عندما اتحدت قارتان.

10. يبدأ تكسر القارات غالبا بتكون قبة من القشرة القارية فى عدة أماكن. وتتكسر حينئذ كل قبة لتكون نظام خسف ثلاثى الأذرع. وقد يؤدى اتصال بعض أذرع الخسف مع بعضها لتكون كسر يتقطع خلال القارة كلها . ويميز بداية التكسر القارى التصدع الكتلى وترسيب تتابعات سميكة من الرواسب الفتاتية السيليكاتية والمتبخرات.

11. قد تؤدى القوى التكتونية فى القشرة الأرضية إلى تشوه مساحات كبيرة من القارات. وقد تكون بعض الحركات الإقليمية بسيطة ورأسية إلى أعلى وإلى أسفل دون تشوه شديد للصخور (إبيروجينى) ، ومن أمثلتها هضبة كولورادو ورفع إسكندنافيا ووسط كندا بعد انصهار المثالج.

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الانترنت)

http://vishnu.glg.nau.edu/people/jhw/Tibet/Tibet.html
http://main.amu.edu.pl/~sgp/gw/gw1.htm
http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html
http://www2.nature.nps.gov/grd/tour/mountain.htm
http://nsccbio.sccd.ctc.edu/tfurutani/field_trip/northcascades.html

المصطلحات المهمة

حزام تجبل	orogenic belt	حافة نشطة	active margin
تجبل (بناء الجبال)	orogeny	أولاكوجين	aulacogen
حافة مستقرة	passive margin	تصدع كتلي	block faulting
رصيف	platform	رسيخة	craton
درز (التحام)	suture	إبيروجيني	epeirogeny
نطاق درز (التحام)	suture zone	خسيف خامل	failed rift
حوض رسوبي	sedimentary basin	حزام تحولي	metamorphic belt
درع	shield	لوح صغير	microplate terrane
أخدود ثلاثي الأذرع	three–armed graben	جبل	mountain
فُرُش دسر	thrust sheets	حزام جبلي	mountain belt
ملتقى ثلاثي الأذرع	triple junction	سلسلة جبال	mountain chain
		مد جبلي (ج مدود جبلية)	mountain range
		منظومة الجبال	mountain system
		نشأة الجبال	orogenesis(orogeny)

الأسـئلة

1- ما الملامح الجيولوجية التى تمكننا من التعرف على الخسف القارى خلال الزمن الجيولوجى الماضى؟ اذكر الملامح التى تمكننا من التعرف على نطاقات صدع قديمة.

2- ما الخسيف الخامل؟ اذكر أهمية تكون نطاقات الخسف الخاملة لتفسير تكسر القارات.

3- لماذا تكون جبال الأنديز أعلى من جبال الأبلاش؟

4- اذكر طريقتين تتكون بها الجبال دون أو بقليل من الطى والتصدع .

5- اذكر مثالاً لأنظمة جبال لاتزال عمليات بناء الجبال بها نشيطة .

6- كيف يفسر الجيولوجيون وجود أنظمة جبال داخل القارات ، مثل جبال الأورال فى روسيا؟

7- اذكر كيف يزداد حجم ومساحة القارات بعملية التزايد.

8- هل الأجزاء الداخلية للقارات تكون عادة أحدث أم أقدم من الحواف؟ لماذا؟

9- كيف يمكن تعرف لوح صغير؟ كيف يمكن إثبات أن اللوح الصغير نشأ بعيداً أم بالقرب من أماكن تواجده؟

10- ما الحافة المستقرة؟ اذكر مثالاً لحافة قارية مستقرة وأخرى نشطة.

11- قارن بين قوى التشوه المصاحبة للجبال المتكونة نتيجة التصدع الكتلى ، وتلك المصاحبة لمعظم أحزمة الجبال الرئيسية.

الفصل

19 مصادر الطاقة والثروة المعدنية

I. أنواع الموارد الجيولوجية
أ. الموارد والاحتياطيات
II. استخدام الطاقة
III. مصادر الطاقة
أ - البترول: الزيت الخام والغاز الطبيعى
1. تواجد الزيت الخام والغاز الطبيعى
2. استخراج الزيت
ب - الخام الثقيل ورمال الزيت (الرمال البترولية)
جـ - طفل الزيت
د - الفحـــم
1 - أنواع الفحم
2- تواجد الفحم
3- التأثيرات البيئية
هـ - اليورانيوم
IV. المصادر البديلة للطاقة
V. الرواسب المعدنية والخامات (الركازات)
أ - أصل الرواسب المعدنية
1- الرواسب المعدنية الصهارية
2- الرواسب المعدنية الحرمائية
3- الرواسب المعدنية المتحولة
4- الرواسب المعدنية الرسوبية
5- رواسب الركيزة (المراقد)
6- الرواسب المعدنية المتبقية (المتخلفة)
ب - أقاليم التمعدن

يرتبط ظهور الحضارات ارتبطاً وثيقاً بمصادر الثروة المعدنية ، حيث لا تقوم أى حضارة دون وجود مصادر للثروة المعدنية. فقد بدأ أسلافنا منذ ملايين السنين استخدام تلك الثروة، فالتقطوا أحجارا ذات أشكال مناسبة واستخدموها فى الصيد ، كما اكتشفوا أن الفلنت والتشرت والأوبسيديان وغيرها تكون شديدة الصلابة فاستخدموها كسكاكين ورؤوس للرماح . وحيث إن معظم تلك الأحجار تكون محدودة الانتشار، فقد قامت تجارة على تلك الأحجار. كما بدأوا فى جمع الملح والتجارة فيه. وعندما بدأت الزراعة أصبح النظام الغذائى للبشر يعتمد على الحبوب مثل القمح والشعير والذرة، كما أصبحت هناك حاجة لكميات إضافية من الملح . ولا نعرف على وجه الدقة متى وأين بدأ استخراج الملح من المناجم. وقد قطعت طرق نقل الملح الكرة الأرضية قبل التاريخ المسجل.

كما بدأ استخدام الفلزات لأول مرة قبل 17000 سنة مضت ، حيث يوجد النحاس والذهب فى الطبيعة كفلزات عنصرية ، ولذا كانا أول الفلزات التى استخدمها الإنسان . ونظراً لندرة النحاس الفلزى فى الطبيعة فقد بحث أسلافنا عن مصادر أخرى للنحاس، حيث استخرجوه من بعض الخامات بعملية صهر المعادن smelting قبل حوالى 6000 سنة مضت. كما استطاعوا أن يصهروا معادن الرصاص، والقصدير والزنك والفضة وفلزات أخرى قبل آلاف السنين .

ثم تلى ذلك توصل الإنسان لتقنية خلط الفلزات ببعضها لعمل سبائك مثل سبيكة البرونز المكونة من خليط من النحاس والقصدير . وقد كانت عملية صهر الحديد أصعب بكثير من صهر النحاس ، ولذلك فلقد جاء تطور صناعة الحديد متأخرا جدا ، أى قبل حوالى 3300 سنة مضت.

وقد كان البابليون الذين عاشوا فى العراق قبل 4500 سنة مضت هم أول من استخدم الزيت كوقود بدلا من الخشب . وكان الصينيون أول من أنشأ المناجم قبل 3100 سنة مضت لاستخراج الفحم واستخدامه. كما كانوا أول من حفر آبارا للتنقيب عن الغاز الطبيعى، حيث وصل عمق بعض الآبار إلى حوالى 100 متر .

ثم أتى الإغريق فالرومان منذ 2500 سنة مضت واعتمدوا على معادن أخرى غير الفلزات والوقود ، فقاموا بتصنيع الأسمنت والجبس والزجاج والخزف الصينى. ثم أخذت المواد التى تستخرج من المناجم تتنوع ، وتستخدم فى أغراض متنوعة ، حيث يوجد اليوم استخدامات صناعية لكل العناصر الكيميائية المتواجدة فى الطبيعة تقريبا . وهناك أكثر من 200 نوع من المعادن تستخرج من المناجم وتستخدم فى أغراض متنوعة .

فمثلا ، يلزم لتصنيع السيارة استخدام عديد من الموارد المعدنية مثل الحديد والكروم والمنجنيز والنيكل والبلاتين والقصدير والنحاس والرصاص والألومنيوم، بالإضافة إلى الكوارتز المستخدم فى صناعة زجاج نوافذ السيارة . كما تحتاج السيارة للبترول كوقود وزيوت ، بالإضافة إلى مطاط الإطارات ، وكمواد بلاستيكية للأجزاء الكهربائية ومواد التنجيد. كما أن هناك الكثير من الموارد المعدنية الأخرى التى تستخدم فى صناعة السيارات مثل التنجستن المستخدم

فى أسلاك المصابيح الكهربائية وكذلك الكبريت اللازم لحامض البطارية.

وقد شعر الناس مؤخرا بأن الموارد المعدنية آخذة فى النضوب بسبب سرعة استهلاكها ، فقللوا من معدل ذلك الاستهلاك . إلا أنه من المستحيل الاستغناء عن تلك الموارد كلية .

I. أنواع الموارد الجيولوجية

تعرف الموارد الجيولوجية **geologic resources** بأنها مواد ذات قيمة من أصل جيولوجى ويمكن استخراجها من الأرض . وهناك ثلاث مجموعات رئيسية من الموارد الجيولوجية وهى :

1- موارد الطاقة energy resources ـ وتشمل البترول (الزيت الخام والغاز الطبيعى) والفحم واليورانيوم ، بالإضافة إلى موارد أخرى مثل موارد الحرارة الأرضية.

2- الموارد المعدنية mineral resources وتشمل:

أ- الموارد الفلزية metallic resources: وتشمل الحديد والنحاس والألومنيوم والرصاص والزنك والذهب والفضة وعديدًا من الفلزات الأخرى.

ب- الموارد اللافلزية nonmetallic resources: وتعرف أيضا بالمعادن الصناعية أو الصخور الصناعية ، مثل الكبريت وأحجار الزينة والجبس والمخصبات والرمل والحصى وأحجار البناء والحجر الجيرى (اللازم لصناعة الأسمنت)، وعديد من المواد الأخرى.

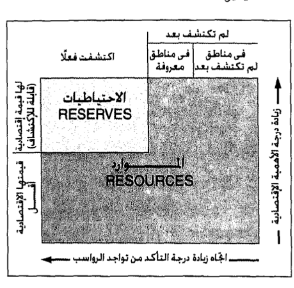
وتعتبر الموارد الجيولوجية مصادر غير متجددة nonrenewable resources ، حيث إن تلك الموارد تتكون ببطء لدرجة أن معدلات الاستهلاك السريع الحالى لها يمكن أن تؤدى إلى استهلاكها بسرعة.

فبعض الموارد الأرضية مثل الأغذية ونباتات الغابات يمكن أن يعاد إنتاجها بمعدل استهلاكها نفسه ، فهى مصادر متجددة renewable resources ، أما البترول والحديد والرصاص واليورانيوم والكبريت والرمال والحصى وكذلك كل الموارد الجيولوجية الأخرى فإنها تستخدم بمعدلات أكبر بكثير من المعدلات التى تتكون بها الرواسب الجديدة. فالفحم والبترول يستهلكان بمعدل أسرع بكثير من المعدل الذى يتكونان به. وتؤدى هذه الحقيقة إلى تزايد أهمية وجود مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية وهى طاقة لا تنفد ، وأيضا الوقود الذى يتكون من أصل عضوى مثل البيوجاز الذى يستخرج من البقايا النباتية وكذلك الطاقة النووية والانشطارية . وهكذا فإن الاكتشافات الجديدة وإعادة تدوير المواد وإيجاد البدائل يمكن أن تساعد فى زيادة عمر بعض الموارد الطبيعية ، إلا أنه من المعروف أن بعض هذه الموارد الطبيعية سوف تشح أو تستنفذ كلية خلال فترة زمنية محدودة .

أ. الموارد والاحتياطيات

يستخدم مصطلح الموارد **resources** كمصطلح عام لوصف الكمية الكلية من المادة الجيولوجية المهمة الموجودة فى الرواسب الجيولوجية ، سواء تلك التى اكتُشفت فعلا أو التى لم تُكتشف بعد ، وتشمل الرواسب التى تستخرج بطريقة اقتصادية حاليا ، وأيضا تلك التى ستستخرج بطريقة اقتصادية فى المستقبل (شكل 1.19)، والاحتياطيات **reserves** ، وهى جزء صغير من الموارد الجيولوجية ، وتشمل الرواسب المكتشفة والتى يمكن استخراجها بطريقة اقتصادية وقانونية فى الظروف الحالية . وجدير بالملاحظة ، أنه من الصعب تقدير الموارد الجيولوجية ،

لأن ذلك التقدير لابد أن يشمل أماكن تواجد الرواسب التى لم تُكتشف بعد ، وأحجامها بالإضافة إلى معرفة نوع الراسب الذى قد يكون استخراجه اقتصاديا يوما ما.



شكل (1.19): الفرق بين الاحتياطيات والموارد الطبيعية . تمثل الاحتياطيات (والتى تشمل الرواسب المكتشفة والتى يمكن استخراجها بطريقة اقتصادية وقانونية فى الظروف الحالية) وهى جزء صغير من الموارد الجيولوجية (والتى تشمل الرواسب الجيولوجية ، سواء تلك التى تم اكتشافها أو التى لم تكتشف بعد ، وهى تشمل الرواسب التى تستخرج بطريقة اقتصادية حاليا ، وأيضا تلك التى ستستخرج بصورة اقتصادية مستقبلا).

(After Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston).

وبمجرد أن تُقدر كمية الموارد الجيولوجية بدقة ، فلا يجب أن يتغير هذا التقدير لاحقا ، نظرا لأن تقدير الموارد الجيولوجية يكون أساسا تقديرًا للمخزون الكلى للمورد ، أما تقدير الاحتياطيات فيتغير باستمرار . فاستخراج أى مادة يؤدى إلى خفض الاحتياطيات بينما تؤدى الاكتشافات الجديدة إلى زيادتها ، مثل رصيد الشخص فى البنك يزيد وينقص باستمرار ، أما الموارد الجيولوجية فهى مثل دخل الشخص المتوقع طوال حياته .

ويجب أيضا أن يكون استخراج الراسب مربحاً ، وذلك بتحقق عدة عوامل منها أن تكون تكاليف الاستخراج والتى تشمل أجور العاملين ووقود الآلات معقولة ، وأن تستخدم تقنيات حديثة فى الاستخراج ، وأن تخفض الضرائب على الموارد ، وتؤدى كل هذه العوامل إلى زيادة الاحتياطيات أيضا .

II. استخدام الطاقة

الطاقة عنصر أساسى فى حياة البشر ، وقد تؤدى أزمة فى إمدادات الطاقة إلى توقف الحياة فى المجتمعات الحديثة . كما قد تسبب الحروب توقف إمدادات البترول ، كما حدث تراجع اقتصادى ملحوظ وتضخم فى الأسعار بسبب التغير الدائم فى أسعار البترول.

وقد أدت زيادة التصنيع فى العالم إلى زيادة الطلب على الطاقة وتغير أنواع الطاقة المستخدمة. فقد اعتمدت الثورة الصناعية فى القرنين الثامن عشر والتاسع عشر على الطاقة المستمدة من الفحم ، وبالتالى زادت الحاجة إلى الفحم ، وزاد البحث عنه .

وبعد حوالى نصف قرن من حفر أول بئر للبحث عن البترول فى أمريكا عام 1859م بدأ الزيت والغاز يحلان محل الفحم ، ليس بسبب الاحتراق النظيف دون أى رماد فقط ، ولكن أيضا لأنه يمكن نقلهما بخطوط الأنابيب ، وكذلك بالبواخر والسكك الحديدية .

وقد شهدت السنوات الأخيرة من القرن العشرين تقدما هائلا فى صناعة المفاعلات النووية ، كما زادت فى الوقت نفسه معاملات الأمان فى تلك المفاعلات ، بحيث أصبحت الطاقة النووية هى البديل الوحيد للوقود الحفرى نظرا لتكلفته المنخفضة وأمانه البيئى .

وقد تزايد الطلب على إنشاء المحطات النووية لتوليد الطاقة الكهربية ولتحلية المياه ، كما احتل الوقود النووى مؤخرا موقع الصدارة بين مصادر الطاقة الأخرى .

III. مصادر الطاقة

تشمل مصادر الطاقة البترول والفحم واليورانيوم بالإضافة إلى المصادر الأخرى مثل مصادر الحرارة الأرضية . وستناول فيما يلى تلك المصادر بالإضافة إلى مصادر الطاقة البديلة.

أ. البترول: الزيت الخام والغاز الطبيعى

يستخدم مصطلح البترول **petroleum** كمصطلح عام فى صناعة البترول ليشمل الزيت الخام والغاز الطبيعى ، كما يستخدم مصطلح البترول أحياناً كمرادف للزيت الخام . **والزيت الخام crude oil** هو سائل خليط من هيدروكربونات (مركبات تحتوى على الهيدروجين والكربون) توجد فى الطبيعة ، يمكن تقطيرها لتنتج أنواعا عديدة من المنتجات ، أما **الغاز الطبيعى natural gas** فهو خليط غازى من هيدروكربونات طبيعية يرجع أصلها وتواجدها إلى أصل وتواجد الزيت الخام أيضا . ويستخرج الغاز الطبيعى من الآبار نفسها التى يستخرج منها الزيت ، على الرغم من أن كليهما يمكن أن يوجد منفصلا .

1. تواجد الزيت الخام والغاز الطبيعى

يتكون الزيت الخام والغاز الطبيعى حين يزيد إنتاج المواد العضوية عن استهلاكها بالتحلل أو بالكائنات الحية آكلة الجيف . ويتوافر هذا الشرط فى البيئات التى يزيد فيها تكون المواد العضوية كالمناطق البحرية ، وحيث يكون الأكسيجين فى رواسب القاع لا يكفى ليحلل كل المادة العضوية. ويتوافر هذان الشرطان فى كثير من أحواض الترسيب المغمورة على الرفوف القارية ، حيث يكون معدل الترسيب فى هذه البيئات عاليا ، كما تُدفن المادة العضوية وتُحمى من التحلل .

وعندما تُدفن المادة العضوية لملايين السنين ، فإنها تتحول ببطء إلى مركبات سائلة وغازية من الهيدروجين والكربون (الهيدروكربونات) ، حيث تحفز درجات الحرارة التى ترتفع مع زيادة العمق تلك التفاعلات الكيميائية . والهيدروكربونات هى المواد القابلة للاحتراق فى البترول (الزيت الخام والغاز الطبيعى).

والتجمعات الزيتية oil pools هى تراكمات ذات قيمة اقتصادية من البترول تحت الأرض. وتتواجد تلك التجمعات البترولية عندما تتحقق ثلاثة شروط معا وهى: (1) **صخر مصدرى source rock** يحتوى على مادة عضوية تتحول إلى بترول نتيجة الدفن وتغيرات ما بعد الترسيب ، مثل صخر الطفل ، ويتم الدفن على عمق كاف (أو نضوج حرارى thermal maturity) ليتم "طبخ cooking" الزيت والغاز من المادة العضوية . (2) **صخر خزان reservoir rock** ذو مسامية ونفاذية تكفى لأن يخزن البترول وينتقل عبره ، مثل الحجر الرملى أو الحجر الجيري، (3) **مصيدة بترولية oil trap** ، وهى مجموعة من الظروف التى تحتفظ بالبترول وتحتجزه بكميات كبيرة فى صخر الخزان وتمنع هروبه **بالهجرة migration** ، ولابد من تواجد الظروف الثلاثة السابقة معا. وإذا لم يتحقق أحد تلك الشروط ، فلن يستطيع الصخر حفظ وحجز الزيت أو الغاز. ويؤدى ضغط الراسب الطينى العضوى فى طبقات المصدر إلى دفع السوائل والغازات المحتوية على الهيدروكربونات فى الصخور المسامية (مثل الحجر الرملى أو الحجر الجيرى المسامى) التى تمثل خزانات الزيت. وتتسبب الكثافة المنخفضة للزيت والغاز فى طفو الزيت والغاز فوق الماء الذى يتواجد بصفة دائمة تقريبا فى مسام الصخور المنفذة .

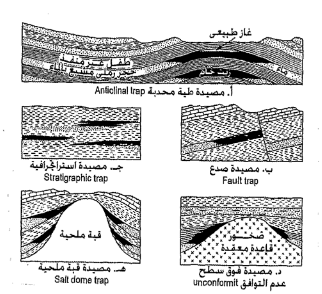
ويحتاج وجود الغاز الطبيعى لتحقق الشروط نفسها اللازمة لتراكم الزيت . ويمكن أن يتواجد الغاز عند أعماق أكبر من تلك التى يتواجد عندها الزيت ، وقد تؤدى الاختلافات فى صخر المصدر أو عمق الدفن أو التاريخ الحرارى للمادة العضوية فى التحكم فى تراكم الغاز أو الزيت أو كليهما معا. ويوضح (شكل 2.19) عدة أنواع من المصايد البترولية للزيت والغاز . وتعتبر الطيات المحدبة anticlines (شكل 2.19 أ) والتى سبق وصفها فى الفصل العاشر، أكثر المصايد البترولية شيوعا ، فحقل بترول النعلا El Nala فى المملكة العربية السعودية – أحد أكبر حقول البترول فى العالم – يمثل مصيدة داخل طية محدبة . فعندما يتواجد الزيت والماء مع بعضهما فى طبقات الحجر الرملى المطوية التى تعلوها طبقات من الطفل غير المنفذ، فإن قطرات الزيت الصغيرة تنساب خلال الحجر الرملى المنفذ فى اتجاه قمة الطية، نظرا لأن الزيت أقل كثافة من الماء. وحيث إن الغاز الطبيعى أقل كثافة من الزيت، فإن الغاز يتجمع فى جيوب تحت ضغط عال نسبيا فوق الزيت. وقد تتسبب الصدوع فى نشأة مصايد بترولية عندما تتكسر صخور الخزانات المنفذة وتنزلق لتجاور طبقة من الطفل غير المنفذ التى تمنع هجرة البترول (شكل 2.19 ب) .

أما المصيدة الاستراتجرافية أو الطباقية stratigraphic trap فإنها تنشأ نتيجة الترسيب الطبيعى الأصلى أكثر من الطى أو التصدع . وتتواجد المصيدة الاستراتجرافية عندما تتواجد عدسة من الحجر الرملى داخل طبقة أكبر من الطفل غير المنفذ (شكل 2.19 ج) . كما قد ينشأ هذا النوع من المصايد عندما تنحصر طبقة من الحجر الرملى المائلة داخل تتابع من الطفل . كما يمكن أن يتراكم الزيت تحت أسطح عدم التوافق unconformities (شكل 2.19 د) ، وقد تتسبب القباب الملحية salt domes فى نشأة بعض أنواع المصايد أيضا (شكل 2.19 هـ) .

أما حقول البترول **oil fields** فهى مناطق يوجد تحتها بركة أو أكثر من الزيت oil pools . وتوجد فى منطقة الشرق الأوسط معظم حقول البترول العملاقة فى العالم ، وخاصة فى المملكة العربية السعودية والكويت . كما تتواجد أيضا فى روسيا وأذربيجان وفينزويلا والمكسيك والولايات المتحدة الأمريكية.

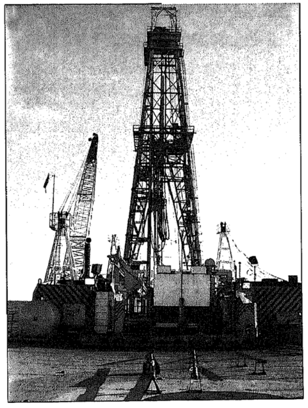
2. استخراج الزيت

عندما يتم اكتشاف تجمع أو حقل بترولى نقوم بحفر آبار فى الأرض . وتستخدم عادة أبراج الحفر (ديريك) derrick الثابتة (شكل 3.19) ، حيث تستعمل أنابيب حفر طويلة. وتستخدم الآن أيضا بعض بريمات الحفر drilling rigs المنقولة والتى يتم تحريكها باستمرار. وعندما يصل البئر إلى تجمع زيتى ، يصعد الزيت إلى أعلى البئر بسبب قلة كثافته عن الماء أو بسبب ضغط الغاز المتمدد والموجود أعلى الزيت. ويقل ضغط الغاز



شكل (**2.19**): قطاعات لتوضيح الأنواع المختلفة من المصايد التركيبية ، والتى تكون مناسبة لتجمع الزيت الخام والغاز الطبيعى .
(After Holmes, D.L., 1984: Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain).

تدريجيا حتى ينتهى ، ويتم حينئذ ضخ الزيت من الآبار. وقد يتم ضخ الماء أو بخار الماء فى الآبار المجاورة لتساعد فى دفع الزيت لأعلى. ويتم فصل الزيت الخام فى مصفاة البترول إلى غاز طبيعى وجازولين (البنزين) وكيروسين وزيت تشحيم وزيت وقود وشحم وأسفلت وبارافين . وتشمل البتروكيماويات المصنعة من البترول الأصباغ والأسمدة والأدوية والمطاط الصناعى والمتفجرات والدهانات والمذيبات والألياف الصناعية واللدائن (البلاسيتك) المستخدمة فى عديد من المنتجات مثل أقراص الحاسبات المدمجة وأشرطة التسجيل وأكياس النفايات.



شكل (3.19): جهاز حفر عن البترول drilling rig .

ونظراً لصعوبة اكتشاف مزيد من الزيت، فقد امتد البحث عن البترول عموما إلى مناطق جديدة غير مطروقة؛ حيث ساهمت الأرصفة البحرية offshore platforms فى البحث عن البترول فى رواسب الأرصفة القارية للمحيطات وأحيانا أبعد من ذلك.

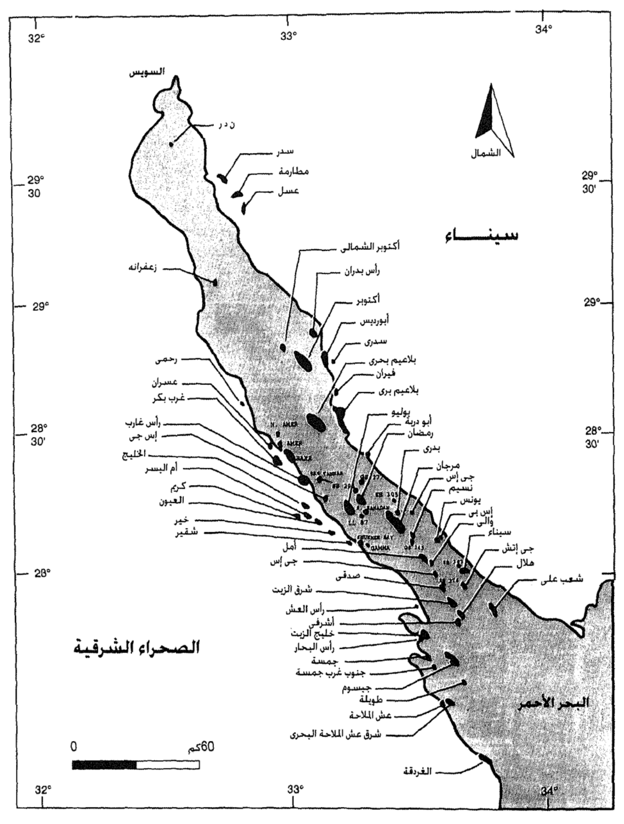
ويأتى أكثر من ربع إنتاج العالم من الزيت وحوالى خمس إنتاج العالم من الغاز الطبيعى من المناطق البحرية، على الرغم من أن الحفر فى المناطق البعيدة عن الشواطئ يكلف ستة أو سبعة أمثال الحفر على اليابسة. ويوضح شكل (4.19) مثالا لتواجدات المناطق البحرية فى خليج السويس ، بجمهورية مصر العربية .

ب) الخام الثقيل ورمال الزيت (الرمال البترولية)

يعرف الخام الثقيل **heavy crude** بأنه بترول كثيف لزج ينساب من البئر بمعدل انسياب بطئ إلى الدرجة التى تجعله غير اقتصادى . ولذلك يستبعد الخام الثقيل من تقدير الاحتياطيات أو الموارد الطبيعية للزيت الخفيف light oil الأقل لزوجة أو الزيت العادى. وقد يتسبب دفع بخار الماء أو المذيبات فى الآبار فى سرعة انسياب الخام الثقيل . وإذا تم استخراجه، فإن الخام الثقيل يمكن تكريره إلى جازولين (بنزين) ومنتجات أخرى عديدة، مثله مثل الزيت الخفيف. ومعظم الزيت فى كاليفورنيا هو من الخام الثقيل.

ورمال الزيت **oil sands** (الرمال البترولية أو رمال القطران tar sands) هى رواسب رمال أو حجر رملى تلتحم حبيباتها بالزفت . **والزفت asphalt** هو مادة صلبة ، ولذلك فإن رمال الزيت تستخرج غالبا من مناجم بدلا من حفر آبار خلالها ، على الرغم من أن تقنيات تخفيض لزوجة الخام الثقيل يمكن تطبيقها أيضا على رمال الزيت.

وأصل الخام الثقيل ورمال الزيت غير معروف حتى الآن. وربما تكون قد تكونت من الزيت العادى نتيجة فقد المكونات الخفيفة نتيجة البخر أو أى عمليات أخرى . وقد يتسرب الزيت من رمال الزيت أو الزفت إلى سطح الأرض نتيجة البخر البطىء. ومن ناحية



شكل (**4.19**): حقول البترول فى خليج السويس .

أخرى فقد تتواجد بعض رمال الزيت والخام الثقيل تحت سطح الأرض عند أعماق تصل إلى 4000 متر.

وتحتوى معظم هذه الخامات على تركيزات عالية من الكبريت وبعض الفلزات مثل النيكل والفاناديوم أكثر من تلك الموجودة فى الزيت العادى ، وذلك قد يرجع إلى أن الخام الثقيل ورمال الزيت لها أصل مختلف عن الزيت الخفيف .

ج. طفل الزيت

طفل الزيت **oil shale** هو طفل أسود أو بنى يحتوى على نسبة عالية من مادة عضوية صلبة غير قابلة للذوبان تعرف بالكيروجين kerogen ، يستخرج الزيت منها بالتقطير . وأفضل طفل زيت يوجد فى الولايات المتحدة فى متكون جرين ريفر Green River Formation الذى يغطى أكثر من 40000 كم^2 فى كولورادو ووميني ويوتا حيث يصل سمك الرواسب إلى حوالى 650 مترا . وقد تكوّن طفل الزيت الذى يحتوى على عديد من حفريات هياكل الأسماك من طين ترسب على قاع بحيرات ضحلة وكبيرة خلال حين الإيوسين . ويرجع أصل المادة العضوية إلى طحالب وكائنات عضوية أخرى عاشت فى البحيرات.

ويتم استخراج الزيت من طفل الزيت فى مصانع التقطير، إلا أن السعر المنخفض للبترول فى بعض الأوقات يجعل استخراج طفل الزيت غير اقتصادى . وقد يسبب استخراج طفل الزيت من المناجم مشكلات بيئية ؛ حيث يتمدد الطفل أثناء التقطير فيشغل منطقة من الأرض يكون استصلاحها مشكلة ، ولذا يكون من الأفضل تجميع الطفل المستهلك فى الوديان وكبسه . فلابد من توافر كمية كبيرة من الماء لعمليتى التقطير والاستصلاح، حيث يظل الإمداد بالمياه مشكلة ، خاصة فى المناطق القاحلة .

وقد تساعد التقنيات الحديثة فى استخراج الزيت فى مكانه دون نقل الطفل إلى سطح الأرض ، فى حل بعض المشكلات وتقليل الماء المستخدم . ومن الممكن أن يتم حرق طفل الزيت الذى تتخلله الشقوق فى حفر ضخمة تحت سطح الأرض . وتتسبب الحرارة فى فصل معظم الزيت من الصخور ، حيث يمكن تجميع الزيت كسائل . ويلاحظ أن الحرائق قد يكون من الصعب التحكم فيها، كما أنها تؤثر فى مستويات المياه الأرضية . وهناك اقتراح آخر يشمل تسخين الطفل بواسطة موجات الراديو أو الموجات الدقيقة جدا microwaves لفصل الزيت السائل من الصخر .

د. الفحم

الفحم صخر رسوبى يتكون من ضغط المادة النباتية التى تتحلل بالكامل . ويمثل الفحم المصدر الرئيسى الثالث للطاقة بعد الزيت والغاز الطبيعى . ولقد زاد استخدام الفحم مؤخرا بعد أن أصبح البترول أكثر ندرة وتكلفة .

ويستخدم حوالى 88 ٪ من الفحم فى الوقت الحالى فى توليد الكهرباء بالولايات المتحدة الأمريكية. كما يستخدم الفحم أيضا فى عمل فحم الكوك الذى يستخدم فى صناعة الصلب. وقد يستخدم الفحم فى المستقبل بدلا من البترول فى تصنيع بعض الكيماويات. وقد يستخدم غاز الفحم coal gas وزيت الفحم coal oil فى بعض الأغراض التى يستخدم فيها الغاز الطبيعى والزيت ، على الرغم من أنهما مازالا أكثر تكلفة فى إنتاجهما .

1. أنواع الفحم

الخث peat هو حطام نباتى لم يدفن إلى عمق يكفى ليتحول إلى فحم ، وهو يتجمع فى ماء يحوى نسبة ضئيلة من الأكسيجين ، وبالتالى القليل من البكتريا التى تسبب التحلل . وهو يمثل المرحلة الأولى فى تكون الفحم ، وتعرف درجة التحول التى وصل إليها الفحم

جدول (1.19): رتب (أنواع) ranks الفحم .

	اللون	محتوى الماء ٪	المتطايرات الأخرى ٪	الكربون المثبت (المتأصل)
خث Peat	بنى	75	10	15
ليجنيت Lignite	بنى إلى أسود	45	25	30
فحم تحت بيتومينى Subbituminous coal	أسود	25	35	40
فحم بيتومينى (فحم لين) bituminous coal	أسود	15-5	30-20	75-50
أنثراسيت (فحم صلب) Anthracite	أسود	5	5	90

1) الخث ليس فحما

2) الكربون المثبت (المتأصل) fixed carbon هو المادة الصلبة القابلة للاحتراق بعد استبعاد الرطوبة والماء والمواد المتطايرة volatiles والرماد .

بالرتبة rank وهى الأساس الذى يقسم الفحم طبقا له إلى سلسلة تبدأ من اللجنيت إلى الأنثراسيت (جدول 1.19) . فعندما يكون الخث جافا ، فإنه يمكن حرقه كوقود . ومع زيادة الضغط، فإن الخث قد يصبح ليجنيت (فحم بنى). وقد يظل الليجنيت محتويا على أجزاء من الخشب يمكن رؤيتها. والليجنيت lignite هو فحم بنى أسود اللون ، وقد يكون بنيا ويتجمد عندما يجف فى الهواء. ويكون اللجنيت عرضة للاحتراق عندما يتأكسد فى الهواء، مما يحد من استخدامه كوقود . ويتميز الفحم تحت البيتومينى subbituminous coal والفحم البيتومينى bituminous coal باللون الأسود ووجود طبقات من مواد نباتية مختلفة . وهما يشتعلان على الفور ويحترقان بلهب مدخن . أما الأنثراسيت anthracite فهو فحم صلب أسود اللون، يتكون عموما تحت ضغط إقليمى يصاحبه طى . والأنثراسيت يشتعل بصعوبة ودون دخان .

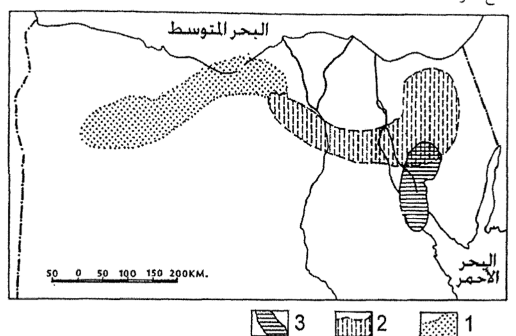
2. تواجد الفحم

يوجد الفحم فى طبقات تتراوح فى السمك بين سنتيمترات قليلة إلى 30 مترا أو أكثر. وإذا وجدت الطبقات مدفونة فى الأعماق فإنه يتم حفر المناجم تحت الأرض لاستخراج الفحم . وعندما تتواجد طبقات الفحم بالقرب من سطح الأرض فإن الفحم يستخرج بطريقة المنجم المكشوف strip mine ، حيث يتم إزالة الغطاء الصخرى حتى ينكشف الفحم عند السطح .

وتتواجد رواسب الفحم المنكشفة فى مصر بمنطقتى المغارة (عصر الجوراسى) وأم بجما (عصر الكربونى) بسيناء . وقد يتواجد الفحم كرواسب تحت سطحية كما هو الحال بمنطقة عيون موسى (عصر الجوراسى) بسيناء بمصر (شكل 5.19) .

3. التأثيرات البيئية

يؤدى استخراج الفحم إلى خلق مشكلات بيئية. حيث يؤدى وجود منجم إلى انخفاض منسوب الماء



شكل (5.19): توزيع رواسب الفحم فى مصر .

(1) المنطقة المحتوية على أعلى محتوى من الفحم فى صخور الطباشيرى السفلى .

(2) المنطقة المحتوية على أعلى محتوى من الفحم فى صخور الجوراسى الأوسط .

(3) المنطقة المحتوية على أعلى محتوى من الفحم فى صخور الكربونى السفلى.

(After Adindani, A., and Shkhov, 1970: The occurrence of coal and some geological features of the Mesozoic and Paleozoic sediments of Egypt. In: Said, R. (Editor): The Geology of Egypt, Balkama, 1990)

الأرضى محليا نتيجة ضخ المياه الأرضية خارج المنجم. كما يؤدى سحب المياه من المناجم لأن تصبح عالية الحموضة . كما تؤدى إلى تلوث المجارى المائية ومصادر المياه عند سطح الأرض. ويؤدى حرق الفحم إلى أن يتلوث الهواء بالرماد وغازات الكبريت ، ولكن معظم المكونات الضارة يمكن إزالتها باستخدام التقنيات الحديثة. ويؤدى حل المشكلات البيئية المصاحبة للفحم، إلى ارتفاع تكلفة استخراجه وسعر بيعه .

هـ. اليورانيوم

يوجد اليورانيوم - المستخدم فى المفاعلات النووية - فى معدن البتشبلند pitchblende وهو أكسيد يورانيوم أسود يوجد فى العروق الحرمائية وفى غيرها ، أو فى معدن الكارنوتيت carnotite الأصفر ، وهو أكسيد مائى معقد يوجد على هيئة قشور فى الصخور الرسوبية. وينقل الماء الأرضى (الجوفى) أكاسيد اليورانيوم العالية الذوبان فى الماء بسهولة . وقد تختزل المادة العضوية اليورانيوم مما يجعله غير قابل للذوبان نسبيا، ولذلك يرسب اليورانيوم عندما يصاحب المواد العضوية.

ويستخدم اليورانيوم لتوليد الكهرباء فى المفاعلات النووية ، كما يستخدم فى صناعة الأسلحة النووية . وتنتج المفاعلات النووية فى الوقت الحالى حوالى 7٪ من احتياجات الطاقة فى الولايات المتحدة . بينما تنتج الطاقة النووية أكثر من نصف إنتاج الكهرباء فى فرنسا .

ومن المتوقع زيادة الطلب العالمى على اليورانيوم نتيجة الاتجاه السائد منذ بداية الألفية الثالثة على استخدام الطاقة النووية كمصدر بديل للوقود الحفرى. وقد حدث تقدم ملحوظ فى مشكلة المخلفات المشعة للمحطات النووية التى تعتبر أقل خطورة على البيئة من مخلفات الفحم والبترول كوقود . وعلى الرغم من حادث تشرنوبيل فلم تتأثر كثيرا النظرة ناحية الطاقة النووية ، حيث إن هذا المفاعل كان يفتقد إلى وجود الدرع الخارجى الذى يمنع التسرب الاشعاعى ، كما أن المفاعل لم يكن يحظى بمعاملات الأمان الواجبة . وقد حدث الشىء نفسه تقريبا فى بنسلفانيا ، ولكن الدرع الواقى احتوى كل الإشعاع فى داخله ولم يترسب منه أى شىء خارجه.

ويوجد معظم اليورانيوم فى جمهورية مصر العربية فى الصخور النارية فى أكثر من موقع بالصحراء الشرقية. كما تحتوى أيضا رواسب الفوسفوريت العضوية ذات الأصل البحرى فى فوسفات البحر الأحمر ووادى النيل على اليورانيوم ، ولكن بتركيزات منخفضة . كما تحتوى أيضا الرمال السوداء المترسبة على الشواطىء الشمالية لدلتا نهر النيل على نسبة صغيرة من المونازيت الذى يحتوى على نسبة منخفضة من الثوريوم.

III. المصادر البديلة للطاقة

هناك عدد آخر من المصادر البديلة alternative sources of energy للطاقة قد تساهم فى المستقبل فى خفض الاحتياج المتوقع للزيت والغاز الطبيعى والفحم واليورانيوم . حيث ستساهم القوة الهيدروكهربية (القوة الكهربائية المائية) hydroelectric power وهى توليد الكهرباء من القوة المائية فى حوالى 4 ٪ من احتياجات الطاقة فى الولايات المتحدة. ويتم توليد الكهرباء باستخدام التوربينات من الماء الساقط من خزانات المياه وراء السدود. وفى مصر، يتم توليد الكهرباء من التوربينات الموجودة عند السد العالى بأسوان . وقد تساهم طاقة حرارة الأرض geothermal power بصورة أساسية فى احتياجات الطاقة، خاصة إذا تم استخدام تقنيات ناجحة لتجميع حرارة المناطق خاصة تلك غير المميزة بينابيع حارة فوق سطح الأرض. وتساهم طاقة حرارة الأرض عموما بحوالى 0.2 ٪ فقط من احتياجاتنا من الطاقة. وقد تساهم الطاقة الشمسية وطاقة الرياح فى سد احتياجاتنا فى المستقبل (شكل 6.19) ، خاصة إذا تم تطوير طرق تخزين الطاقة . وتبذل فى الوقت الحالى جهود ضخمة لتحسين تقنية تجميع الطاقة الشمسية . وتشمل الطرق الأخرى لتوليد الطاقة استخدام طاقة المد والجزر وطاقة الأمواج وطاقة تيارات المحيط والطاقة الناتجة من الاختلافات فى درجة الحرارة رأسيا فى المحيطات .

وترجع الأهمية الكبرى لعديد من مصادر الطاقة البديلة أنها طاقات متجددة ، فنحن لا نستنفد أشعة الشمس أو الرياح أو المد والجزر عندما نستخدم طاقتها. وقد يؤدى انتشار استخدام مصادر الطاقة المتجددة فى المستقبل إلى تقليل احتياج العالم إلى الوقود الحفرى .



شكل (6.19): الطاقة المتجددة ، حيث تساهم طاقة الرياح فى توليد الطاقة . محطة توليد الطاقة من الرياح قرب الغردقة بساحل البحر الأحمر ، مصر .

V. الرواسب المعدنية والخامات (الركازات)

يعتمد البحث الناجح عن المعادن المستخدمة فى الصناعة على وجود الرواسب المعدنية التى يتم استخلاص المواد المطلوبة منها بأقل تكلفة . **والرواسب المعدنية mineral deposits** هى أى حجم من صخر يحتوى على تركيز عال من معدن أو أكثر . وكلما زاد تركيز المعادن المطلوبة زادت قيمة الراسب. وفى بعض الرواسب تكون بعض المعادن المطلوبة مركزة بدرجة عالية لدرجة أن بعض العناصر النادرة جدا مثل الذهب والبلاتين يمكن رؤيتها بالعين المجردة. ولكل معدن رتبة أو مستوى تركيز **grade** ، حيث يكون استخراج الراسب الذى تقل درجته عن هذه الدرجة غير اقتصادى (شكل 6.19). وتستخدم كلمة خام للتمييز بين رواسب المعدن المربحة وغير المربحة. ويعنى مصطلح خام (ركاز) **ore** تجمعًا من المعادن يمكن استخراج معدن أو أكثر من معدن منه بصورة مربحة. ويوضح جدول (2.19) بعض معادن الخامات الشائعة.

جدول (2.19): بعض معادن الخامات الشائعة

الفلز		معدن الخام		التركيب
الألومنيوم	Aluminium	بوكسيت (خليط معدنى)	Bauxite	$Al_2O_3.nH_2O$
الكروم	Chromium	كروميت	Chromite	$FeCr_2O_4$
النحاس	Copper	نحاس خالص (صرف)	Native copper	Cu
		كالكوسيت	Chalcocite	Cu_2S
		كالكوبيريت	Chalcopyrite	$CuFeS_2$
الذهب	Gold	ذهب خالص (صرف)	Native gold	Au
الحديد	Iron	هيماتيت	Hematite	Fe_2O_3
		ماجنيتيت	Magnetite	Fe_3O_4
الرصاص	Lead	جالينا	Galena	PbS
المنجنيز	Manganese	بيرولوسيت	Pyrolusite	MnO_2
الزئبق	Mercury	سينابار	Cinnabar	HgS
النيكل	Nickel	بنتلانديت	Pentlandite	Fe,Ni)S)
الفضة	Silver	فضة خالصة	Native silver	Ag
		أرجنتيت	Argentite	Ag_2S
القصدير	Tin	كاسيتريت	Cassiterite	SnO_2
اليورانيوم	Uranium	بيتشبلند	Pitchblende	U_3O_8
		كارنوتيت	Carnotite	$K(UO_2)_2(VO_4)_2.3H_2O$
الزنك	Zinc	سفاليريت	Sphalerite	ZnS

وتعتبر كل الخامات رواسب معدنية لأن كلا منها إثراء محلى لمعدن أو أكثر من معدن، أو أشباه المعادن. ومع ذلك، فالعكس ليس صحيحاً ، إذ ليست كل الرواسب المعدنية خامات . "فالخام "ore هو مصطلح اقتصادى ، بينما "الراسب المعدني" هو مصطلح جيولوجى .

ويعتمد اعتبار المعدن (أو الصخر) خاما من عدمه على التركيب الكيميائى للخام ، ونسبة الفلز المستخرج وقيمة الفلز فى السوق. فيعتبر معدن الهياتيت (Fe_2O_3) خام حديد جيدًا لأنه يحتوى على 70 ٪ من وزنه حديد ، وهذه نسبة عالية ومربحة لاستخراج الحديد عند الأسعار الحالية أما الليمونيت ($Fe_2O_3nH_2O$) ، وهو ليس معدنا ولكنه أحد خامات الحديد الهامة ، فيحتوى على نسبة حديد أقل من تلك الموجودة فى الهياتيت. وحتى إذا كان المعدن يحتوى على نسبة عالية من الفلز فإنه لا يمكن وصفه بأنه خام، إذا كان الفلز من الصعب جدا استخراجه ، أو لوجود شوائب مصاحبة للخام ، أو يكون موقع الخام بعيدا جدا عن الأسواق ؛ فالربح هو جزء مهم يحدد أنه خام .

وليس من السهل دائما تحديد درجة أو كمية المعدن بدقة . فمن المعلوم أن ما قد يعتبر خاما فى وقت ما لا يكون خاما فى وقت آخر. ويقدم النحاس مثالا مهما لذلك ، حيث ارتفعت فى الوقت الحاضر درجة

النحاس من 0.5 إلى 1٪ بسبب زيادة الإنتاج العالمي من النحاس المستخرج ، مما أدى إلى غلق عديد من المناجم .

المعادن الغثة: تكون معادن الخامات مثل السفاليريت والجالينا والكالكوبيريت ، والتي يمكن استخراج الفلزات المطلوبة منها ، مختلطة بمعادن ليس لها قيمة اقتصادية يطلق عيها مصطلح **المعادن الغثة gangue minerals** (تنطق جانج) . ومن المعادن الشائعة التي توجد عموماً كمعادن غثة الكوارتز والفلسبار والميكا والكالسيت والدولوميت.

أ. أصل الرواسب المعدنية

تتكون الرواسب المعدنية نتيجة لعمليات جيولوجية، تؤدي إلى تركيز معدن أو أكثر في الصخور . ويعتمد تصنيف الرواسب المعدنية على طبيعة العمليات التي يتم بها تركيز المعادن الرئيسية في الرواسب .

ويتم تركيز المعادن بطرق عديدة من أهمها:

1. التركيز بالعمليات الصهارية في جسم صخر ناري لتتكون الرواسب المعدنية الصهارية magmatic mineral deposits .
2. التركيز بمحاليل ساخنة تنساب عبر الكسور والفراغات والمسام في صخور القشرة الأرضية لتتكون الرواسب المعدنية الحرمائية hydrothermal mineral deposits .
3. التركيز بعمليات التحول لتتكون الرواسب المعدنية المتحولة metamorphic mineral deposits.
4. التركيز بالترسيب من ماء بحيرة أو ماء بحر لتتكون الرواسب المعدنية الرسوبية sedimentary mineral deposits .
5. التركيز بالمياه السطحية في الأنهار أو المجاري المائية عموما ، أو على امتداد الشاطئ لتتكون رواسب الركيزة (المراقد) placer deposits .
6. التركيز بعمليات التجوية لتتكون الرواسب المعدنية المتبقية residual mineral deposits .

ونعرض فيما يلي وصفا لكل من هذه الأنواع:

1. الرواسب المعدنية الصهارية

تعتبر عمليتي الانصهار الجزئي والتبلور التجزيئي fractional crystallization طريقتين لفصل بعض المعادن عن بعضها البعض ، وخاصة التبلور التجزيئي الذي يؤدي إلى نشأة رواسب معدنية مهمة. وهذه العمليات هي عمليات صهارية تماما، لذلك فإنه يشار إلى تلك الرواسب بأنها **رواسب معدنية صهارية magmatic mineral deposits** ، ومن أمثلة هذه الرواسب:

البجماتيت: البجماتيت pegmatites هي صخور متداخلة خشنة الحبيبات بشكل غير عادي (أكبر من 1 سم) ذات تركيب جرانيتي غالبا ، وتوجد عادة على شكل عروق أو قواطع أو عدسات في باثوليثات جرانيتية .

وتتكون البجماتيت نتيجة التبلور التجزيئي لصهارة جرانيتية تحتوي على تركيزات عالية من بعض الفلزات مثل الليثيوم والبريليوم والسيزيوم والنيوبيوم واليورانيوم (Li, Be, Cs, Nb, U). ويتم تعدين معظم الليثيوم في العالم من البجماتيت مثل تلك الموجودة في بيكيتا Bikita في زيمبابوي. وهو أحد معادن خام البريليوم الرئيسية في البجماتيت .

الكروميت: يؤدي الاستقرار البلوري crystal settling إلى تكون رواسب معدنية مهمة ، وهو يحدث عندما ترسب المعادن التي تكونت مبكرا إلى غرفة صهارة أو جسم يبرد من الصهارة . وتكون هذه العملية مهمة في الصهارة البازلتية المنخفضة اللزوجة عندما تتبلور في غرفة صهارة كبيرة، حيث يكون أول

المعادن التى تتكون هو معدن الكروميت chromite ، وهو معدن رئيسى لخام فلز الكروميوم . ويمكن أن يؤدى استقرار بلورات الكروميت العالية الكثافة على قاع غرفة الصهارة إلى تكون طبقات نقية تقريبا من الكروميت. ويتواجد الكروميت فى مصر بصورة غير اقتصادية على هيئة كتل صغيرة وغير منتظمة عدسية الشكل داخل صخور السربنتينيت، فى تتابعات الأوفيوليت فى جنوب الصحراء الشرقية (مثل مناطق جبل المقسم وأم الطيور ووادى العلاقى وأبو ضهر ووادى غدير) . ويأتى معظم إنتاج العالم من الكروم والبلاتين من متداخل واحد ضخم هو البوشفيلد Bushveld Complex فى جنوب أفريقيا. وفى مونتانا، تحتوى جدة موازية ضخمة من ماقبل الكمبرى تسمى معقد ستيل وتر Stillwater Complex على رواسب معدنية مماثلة تحتوى على فلزى الكروم والبلاتين ولكن بدرجة أقل.

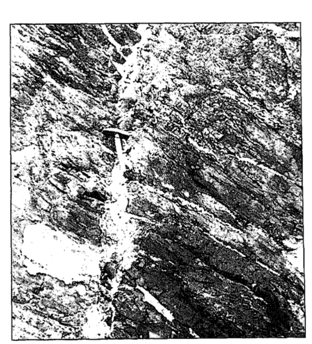
الكمبرليت: يتواجد الماس وهو أكثر المعادن صلابة، فى صخور نارية فوقمافية تسمى كمبرليت kimberlites، من اسم مدينة كمبرلى Kimberley فى جنوب أفريقيا ، حيث توجد تلك الصخور. وقد تداخلت تلك الصخور إلى سطح الأرض من الأجزاء العميقة فى القشرة الأرضية أو الوشاح العلوى على هيئة أنابيب ضيقة وطويلة . وقد أوضحت التجارب المعملية أن صخور الكمبرليت الحاملة للماس نشأت عند أعماق كبيرة ؛ لأن الماس الموجود فيها يتكون فقط تحت ظروف من الضغط العالى جدا الذى يوجد فى الوشاح. وينبثق الكمبرليت إلى سطح الأرض بسرعة عالية، تحت قوة دفع المتطايرات المضغوطة ، مثل بخار الماء وثانى أكسيد الكربون . وبالطبع لم ير أحد عملية انبثاق الكمبرليت . وقد شبهها أحد الجيولوجيين بطلقة من بندقية ، اندفعت من الوشاح خلال الغلاف الصخرى إلى سطح الأرض. وقد وجدت تراكمات غنية بالماس فى رواسب طينية على بعد مئات الكيلومترات من أنابيب الكمبرليت حيث نقل بالأنهار التى التقطت كسرات تم تعريتها من الأنابيب ، ثم حملت مع المجارى المائية المنسابة.

2. الرواسب المعدنية الحرمائية

يحتوى عديد من المناجم الشهيرة فى العالم على خامات تكونت نتيجة ترسيب الخامات من محاليل ساخنة تعرف بالمحاليل الحرمائية **hydrothermal solutions** . (hydro كلمة يونانية تعنى الماء ، و thermo كلمة مشتقة من therme وهى كلمة يونانية تعنى حرارة) . ومن المعلوم أنه من الصعب اكتشاف أصل المحاليل الحرمائية. فقد تنشأ بعض المحاليل من الصهارة نفسها عندما ينطلق الماء الذائب فى الصهارة فى الصخور المحيطة عندما تصعد الصهارة وتبرد. وتتكون بعض المحاليل الأخرى من مياه الأمطار أو من ماء البحر التى تدور وتتحرك بعمق فى القشرة الأرضية. ويوضح شكل (21.17 ، 12.19) طريقة نشأة المحاليل الحرمائية نتيجة تخلل ماء البحر للقشرة المحيطة على امتداد الحيود المحيطية ، حيث يسخن الماء ويصعد لأعلى بواسطة الحمل الدورانى convection ، ويتفاعل ماء البحر الساخن مع الصخور الملامسة له ، مما يسبب تغيرات كيميائية فى كل من الصخور والمحاليل. وعندما تتفاعل المعادن ، فان الفلزات الشحيحة مثل النحاس والزنك الموجودة فى الصخور، تنطلق نتيجة الإحلال الأيونى وتصبح مركزة فى ماء البحر الساخن . ونظرا لأن مصدر الحرارة لهذا النوع من المحاليل الحرمائية هو النشاط البركانى لحيود وسط المحيط، كما أن معادن الخام المترسبة تكون دائما كبريتيدات، فإن رواسب المعادن المتكونة من تلك المحاليل تسمى رواسب الكبريتيد الكتلية البركانية النشأة **volcanogenic massive sulfide**

deposits . وأيا كانت الطريقة التى تكونت بها المحاليل الحرمائية ، فإنها تصنف عموما إلى ثلاثة أنواع من رواسب الخامات الحرمائية وهى : العروق الحرمائية والرواسب المعدنية المنثورة ورواسب الينابيع الحارة.

- **العروق الحرمائية**: تعرف العروق الحرمائية **hydrothermal veins** بأنها أجسام خام محدودة السمك مسطحة (نضيدية) الشكل تكونت على امتداد الكسور والفواصل والصدوع وأسطح التطبق فى الصخور الرسوبية وأسطح التورق **foliation** فى الصخور المتحولة (شكل 7.19). ويمكن أن يتكون الخام من السوائل التى تنساب فى الفراغات على امتداد الكسور. وقد يحل الخام محل الصخور المحيطة بجدران الكسور. وتكوّن العروق الحرمائية عديدًا من الرواسب المعدنية فى العالم من الرصاص والزنك والفضة والذهب والتنجستن والقصدير والزئبق ، وفى بعض الأحيان النحاس .



شكل (**7.19**): عروق صغيرة من معدن الماغنيزيت تملأ الكسور فى صخور السربنتينيت ، وادى أم غيج - الصحراء الشرقية - مصر .

- **الرواسب المعدنية المنثورة**: قد تتكون من المحاليل الحرمائية رواسب معدنية فى صورة متناثرة ومبعثرة فى الصخور . وهنا يكون حجم الصخور أكبر بكثير من حجم العروق ، وتعرف تلك الرواسب **بالرواسب المعدنية المنثورة disseminated mineral deposits**. وتتبع كثير من رواسب النحاس فى العالم الرواسب المنثورة (وتسمى أيضا **رواسب النحاس البورفيرى porphyry copper deposits** لأن البلوتون المصاحب يكون عادة ذا نسيج بورفيرى). ويترسب مع النحاس عديد من الفلزات الأخرى ، مثل الرصاص والزنك والموليبدنم والفضة والذهب (وكذلك الحديد ولكن بكميات غير اقتصادية) . وتتواجد رواسب النحاس البورفيرى فى مصر بالصحراء الشرقية بمنطقتى حمش وأم جرايات .

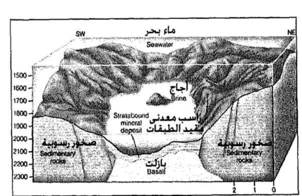
- **رواسب الينابيع الحارة**: عندما تصعد المحاليل الحرمائية إلى سطح الأرض فإنها تكون **الينابيع الحارة hot springs**. وقد تحتوى هذه الينابيع الحارة على كميات كبيرة من الفلزات الذائبة. وتحتوى بعض الينابيع الحارة فى كاليفورنيا على كميات كبيرة من الزئبق بحيث يكون الماء غير مناسب للشرب. ومن أهم الينابيع الحارة تلك الموجودة على قاع البحر ، والتى يمكن أن ترسب أحجاما كبيرة من الكبريتيدات الفلزية بكميات كبيرة.

الرواسب المعدنية الحرمائية المتكونة حاليا

حدث أول اكتشاف للرواسب المعدنية الحرمائية المتكونة حاليا بالصدفة عام 1962م ، فحتى ذلك الوقت لم يكن أحد يعرف أين يبحث عن المحاليل الحرمائية الحديثة . فقد اندهش الحفارون أثناء البحث عن البترول فى أمبريال فالى Imperial Valley فى جنوب كاليفورنيا عندما اخترقوا **أجاج** (ماء ملح مر) **brine** تبلغ درجة حرارته 320°C على عمق 1.5 كم.

وعندما انساب الأجاج إلى أعلى، فإنه برد وترسبت المعادن من المواد الذائبة فى السوائل . ورسب البئر على امتداد ثلاثة أشهر ثمانية أطنان من المعادن السيليكية التى تحتوى على 20 ٪ من وزنها نحاس و8 ٪ من وزنها فضة. وهكذا وجد الحفارون أن محلولاً حرمائيًّا رسب راسبا معدنيا غنيا تحت ظروف مناسبة ، وهذا الاكتشاف يدل على أن الحاضر مفتاح الماضى .

أما الاكتشاف الثانى فقد حدث عام 1964 م ، حين اكتشف علماء البحار سلسلة من أحواض الأجاج الساخن والعالى الكثافة على قاع البحر الأحمر . وقد وجدت أحواض الأجاج فى الأخدود الذى تكون نتيجة مركز الانتشار بين اللوحين العربى والأفريقى المتباعدان (شكل 8.19). وقد اكتشف العلماء أن ذلك الأجاج مالح للغاية وأكثر كثافة من ماء البحر، ولذلك فإنه يبقى فى الأحواض فى الأخدود ، على الرغم من أن درجة حرارة السوائل تصل إلى حوالى 60° م . وقد اكتشف عديد من تلك الأحواض الآن .



شكل (**8.19**): راسب معدنى مقيد الطبقات **stratabound mineral deposit** .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

ويصعد أجاج البحر الأحمر على امتداد الصدوع العادية المصاحبة للخسيف الأوسط فى مركز الانتشار، حيث وصل الأجاج إلى تركيبه الحالى خلال التفاعل مع الصخور المحيطة . وقد كان اكتشاف أجاج البحر الأحمر مدهشا، عندما اكتشف أن الرواسب عند قاع أحواض الأجاج تحتوى على رواسب معدنية مثل الكالكوبيريت والجالينا والسفاليريت. وبمعنى آخر، فقد اكتشف علماء البحار رواسب معدنية حديثة مقيدة الطباقية **stratabound** أثناء تكونها ، أى رواسب يقتصر وجودها على وحدة استراتجرافية معينة .

3. الرواسب المعدنية المتحولة

يمكن أن يؤدى التحول التماسى (الحرارى) contact (thermal) metamorphism إلى نشأة رواسب التنجستن والنحاس والرصاص والزنك والفضة وفلزات أخرى فى الصخور المحيطة ، حيث يزال الصخر كليا أو جزئيا ثم يحل الراسب مكانه . ويحدث ذلك عندما تتفاعل طبقات من الحجر الجيرى مع المحاليل الحرمائية فتتكون أجسام خامات كبيرة وغنية جدا . ومن أهم أمثلة الرواسب المعدنية المتحولة رواسب مارى كاثلين الأسترالية .

4. الرواسب المعدنية الرسوبية

تشمل الرواسب المعدنية الرسوبية **sedimentary mineral deposits** بعض أهم مصادر المعادن فى العالم. ويتجمع عديد من المعادن الهامة اقتصاديا بالعوامل الكيميائية أو الطبيعية فى العمليات الرسوبية ، ومن الرواسب المعدنية الرسوبية رواسب المتبخرات ورواسب الحديد والرواسب المعدنية مقيدة الطباقية .

رواسب المتبخرات: تتكون رواسب معدنية رسوبية مباشرة عندما يتبخر ماء بحيرة أو بحر. وتسمى طبقات الملح الذى يترسب نتيجة البخر برواسب المتبخرات evaporite deposits . وهى تشمل الأملاح التى تترسب من مياه البحيرات التى تحتوى على كربونات الصوديوم (Na_2CO_3) أوكبريتات الصوديوم

(Na_2SO_4) أوالبـوراكس $(Na_2B_4O_7.10H_2O)$. وقد تم تعدين البـوراكس والمعـادن الأخرى المحتويـة على البورون من رواسـب المتبخـرات فى البحـيرات فى كاليفورنيا والأرجنتين وبوليفيا وتركيا والصين ووادى النطرون فى مصر .

وتعتبر المتبخرات البحرية المتكونة نتيجة تبخـر مـاء البحر، أكثر شيوعا وأهمية مـن متبخـرات البحـيرات . ومـن الأمـلاح المترسـبة مـن مـاء البحـر الجبس $(CaSO_4.2H_2O)$ والهاليت $(NaCl)$ والكارناليت carnallite $(KClMgCl_2.6H_2O)$. ويـؤدى تحـول رواسـب المتبخـرات البحريـة عنـد درجـات التحـول المنخفضـة إلى تكون معدن آخـر مهـم هـو الـسيلفيت sylvite (KCl) . ويستخلص من المتبخـرات البحريـة معظم ملح الطعام الذى نستخدمه فى حياتنـا اليوميـة ، بالإضافة إلى الجـبس المـستخدم كجـص والبوتاسـيوم المستخدم فى أسمدة النباتات.

رواسب الحديد: تنتشر رواسـب الحديـد الرسـوبى على نطاق واسع ، ويكون متوسط كمية الحديـد فى مـاء البحر صغيرا إلى حـد أن تلـك الرواسـب لا يمكـن أن تكون قد تكونت من ماء بحر يشبه فى تركيبه ماء البحـر الحالى.

ويوجـد أكـبر خامـات الحديـد حجـما فى صـخور رسوبية تتبع ماقبل الكمبرى (البروتيروزوى المبكـر أى قبل 2 بليون سنة أو أكثر)، حيث كان الغـلاف الجـوى للأرض فقيرا فى الأكـسيجين فى هـذا التـاريخ المبكـر. ويعتقـد الآن أن تواجـد الأكـسجين بـنسبة منخفـضة سمح بانتشار الحديد فى صورة ذائبة، فى شـكل جـزىء الحديدوز (Fe^{2+}) حيـث تـم غـسله وإزالتـه بكميـات كبيرة من سطح الأرض. ولقد تم نقل الحديـد (Fe^{2+}) فى السوائل بواسطة الميـاه الـسطحية إلى بيئـات بحريـة واسعة وضحلة ، حيث تأكسد إلى جـزيء حديـد غـير قابل للذوبان (Fe^{3+}) ثم ترسب . وقد ترسـب الحديـد فى العديد من تلك الأحواض فى صورة طبقـات رقيقـة متبادلة مع طبقات من رسوبيات غنية بالسيليكا تسمى التشرت chert. ويسمى هذا النوع من خامات الحديد باسم متكونـات الحديـد الـشريطى (banded (BIF iron formations . وتعتبر رواسب حديد البحيرات العظمى فى كندا وأمريكا من هذا النـوع ، والتـى تعتـبر المصدر الأساسى لصناعة الحديد والصلب فى الولايات المتحـدة الأمريكيـة . ولـذلك يعـرف هـذا النـوع مـن رواسب الحديد بأنه من طـراز ليـك سـوبريور Lake Superior type. وتتواجد رواسب الحديد من طـراز ليك سوبريور فى الأحواض الرسوبية فوق كل رسيخة craton ؛ خاصـة فى لابـرادور وفينـزويلا والبرازيـل، والاتحاد السوفيتى سابقا وجنوب أفريقيا واستراليا.

ويعتقـد بعـض الجيولـوجيين أن بعـض متكونـات الحديد الشريطى تنشأ نتيجة نشاط بركانى فى عـدد مـن الأحـواض المنفـصلة المتواجـدة بـين أقـواس الجـزر البركانية ، حيـث تتواجـد كمتكونـات قليلـة الامتـداد وطبقات قليلة السمك . ويعرف هذا النوع من رواسب الحديد بأنه من طراز ألجوما Algoma type.

ويعتـبر بعـض الجيولـوجيين أن رواسـب الحديـد الشريطى بالصحراء الشرقية بمـصر (مثـل منـاطق أبـو مـروات وأم نـار ووادى كـريم ووادى الـدباح وجبـل الحديد) مـن طـراز ألجومـا ، حيـث تتواجـد رواسـب الحديد فى تلك المناطق على شكل طبقات وعدسات من الماجنيتيت والمارتيت والهيماتيـت قليلـة الـسمك (عـدة سنتيمترات إلى 10 أمتار) ، وفى تتابعـات مـن صـخور ماقبـل الكمـبرى ، وحيـث تعرضـت تلـك التتابعـات لتحـول مـنخفض الرتبـة (شـكل 9.19) . كـما تتميـز رواسب الحديد تلك بانتشار الطى والصدوع .

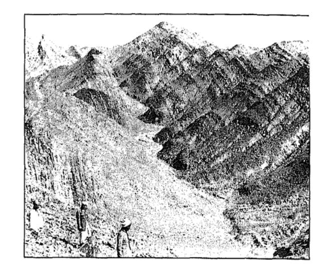
5. رواسب الركيزة (المراقد)

ناقشنا فيما سبق الطريقة التى يمكن أن يصبح بها معدن ذو وزن نوعى عالى مُركزا بالمياه المنسابة. وتسمى رواسب المعادن ذات الوزن النوعى العالى التى يتم تركيزها ميكانيكيا من المجارى المائية بسرعة أكبر من المعادن الأخف مثل الكوارتز والفلسبار برواسب الركيزة (المراقد) **placer deposits**. وأهم المعادن التى يتم تركيزها فى المراقد الذهب والبلاتين والكاسيتريت (SnO_2) والماس والزيركون. ويوضح شكل (10.19) أهم مواقع رواسب المراقد، والتى توجد خلف حواجز صخرية أو فى حفر فى صخر الأساس على امتداد قنوات المجارى المائية وتحت مساقط المياه وداخل المنعطفات فى المجارى المائية وكذلك عند نقطة التقاء رافد بمجرى مائى رئيسى.

ويمكن أحيانا تتبع رواسب الركيزة (المراقد) فى اتجاه أعلى النهر إلى موقع الراسب المعدنى الأصلي، والتى تكون عادة ذات أصل نارى، حيث تم تعرية المعادن منها. ولقد أدت تعرية عديد من العروق الحاملة للذهب الموجودة على الجانب الغربى لجبال سيرا نيفادا، إلى تكون رواسب الركيزة التى اكتشفت عام 1848م، وأدت إلى جنون الذهب المعروف فى كاليفورنيا. ولقد تم اكتشاف رواسب الركيزة أولا ثم اكتشف مصدرها لاحقا. ولقد أدى اتباع المنهج نفسه إلى اكتشاف مناجم الماس فى كيمبرلى فى جنوب أفريقيا منذ مائتى عام.

6. الرواسب المعدنية المتبقية (المتخلفة)

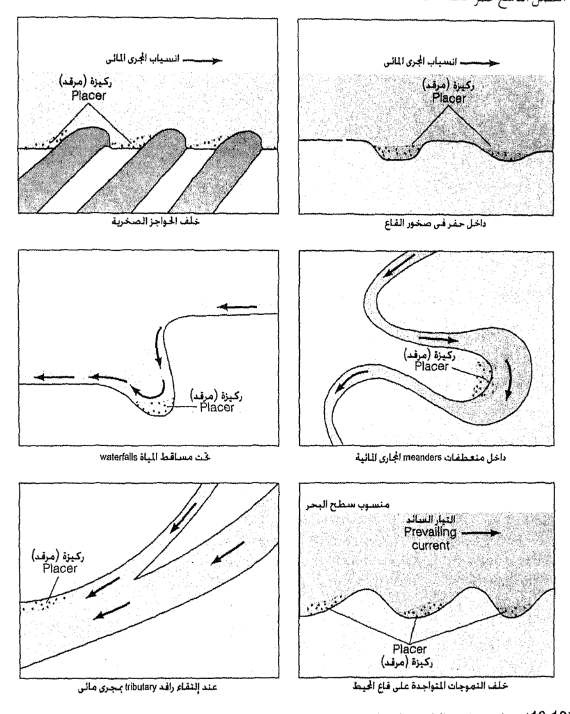
تحدث التجوية عندما يتعرض صخر منكشف حديثا وغير مستقر كيميائيا لماء المطر والغلاف الجوى. وتؤدى التجوية الكيميائية إلى إزالة المواد الذائبة فى المحلول وتركيز المعدن المتبقى الأقل ذوبانا. ويعتبر اللاتيريت **laterite** مثالاً شائعاً على راسب معدنى



شكل (**9.19**) : متكون الحديد الشريطى **Banded Iron Formation**، حيث توجد طبقات قليلة السمك (رقيقة) من الحديد متداخلة مع الشست بمنطقة أم نار - الصحراء الشرقية - مصر. (أ.د. محمود فوزى الرملى - هيئة المساحة الجيولوجية).

الرواسب المعدنية محصورة الطباقية: توجد بعض خامات الرصاص والزنك والنحاس فى العالم فى الصخور الرسوبية. وتوجد تركيزات معادن الجالينا والسفاليريت والكالكوبيريت والبيريت فى طبقات رقيقة منتظمة تبدو كالرواسب. وينحصر وجودها فى جزء محدد من التتابع الطبقى الذى تنتمى إليه وتكون موازية للطبقات فيه، ولذلك تسمى بالرواسب المعدنية محصورة الطباقية stratabound mineral deposits. وتشبه تلك الرواسب المعدنية الرسوبيات، ويعتقد أنها نشأت نتيجة تغيرات ما بعد الترسيب diagenesis.

وتتكون الرواسب المعدنية محصورة الطباقية عندما يغزو محلول حرمائى راسب دقيق الحبيبات ويتفاعل معها. ويتسبب التفاعل بين حبيبات الراسب والمحلول فى ترسيب معادن الخامات، حيث يحدث الترسيب عادة قبل أن يتحول الراسب إلى صخر رسوبى. وتعتبر رواسب النحاس المشهورة فى زامبيا ورواسب كوبفرشيفر فى ألمانيا وبولندا خامات محصورة الطباقية.



شكل (10.19): تتواجد رواسب الركيزة (المراقد) placer deposits حينما تسمح الحواجز للماء المتدفق أو المنساب أن يحمل الحمولة المعلقة من الحبيبات خفيفة الوزن بعيدا ، بينما يحجز الحبيبات ذات الوزن الكبير المتواجدة في حمولة القاع .

(After Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York).

متبقى **residual mineral deposit** تكون نتيجة الإثراء بالتجوية. حيث يتم تركيز عنصرى الحديد والألمنيوم . والليمونيت ($Fe_2O_3 . n H_2O$) هو أحد خامات الحديد الأقل ذوبانا التى تتكون بسبب التجوية الكيميائية . ويتم غسل وإزالة معظم المعادن من التربة ببطء فى المناطق القارية الدافئة وتحت الأمطار الشديدة، حيث تترك قشرة من اللاتيريت غير الذائبة تشمل الليمونيت الغنى بالحديد . وفى مناطق قليلة مثل

جنوب أفريقيا قد تكون رواسب اللاتيريت غنية بالحديد بدرجة تكفى لاستخدامها كخام حديد .

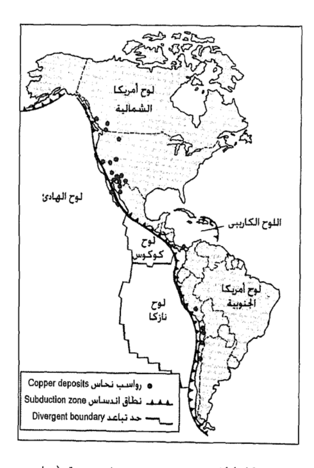
وعلى الرغم من أن رواسب اللاتيريت الغنية بالحديد هى أكثر أنواع اللاتيريت شيوعا، إلا أن رواسب اللاتيريت الغنية بالألومنيوم والمسماة بالبوكسيت **bauxites** هى أيضا من أنواع اللاتيريت المهمة خاصة للاستغلال الاقتصادى. ويتكون البوكسيت نتيجة غسل وازالة معادن الصلصال . وهى عملية يتم فيها إزالة السيليكا من الصخور ويبقى معدن الجبسيت gibbsite $Al(OH)_3$ كراسب متبقٍ. ورواسب البوكسيت الغنية بالجبسيت هى أهم مصادر الألمونيوم فى العالم. ويشير تواجد رواسب البوكسيت فى الوقت الحالى فى مناطق معتدلة المناخ ، مثل فرنسا والصين والمجر، أن المناخ كان قاريا عندما تكونت رواسب البوكسيت.

ب. أقاليم التمعدن

تميل أنواع من الرواسب المعدنية للتواجد فى مجموعات ، وتكون ما يطلق عليه جيولوجيو الاستكشاف أقاليم التمعدن **metallogenic provinces** وتعرف تلك الأقاليم بأنها مناطق محدودة من القشرة الأرضية يتواجد فيها رواسب معدنية بأعداد كبيرة . ويوضح شكل (11.19) مثالا لإقليم تمعدن يتواجد على امتداد الجانب الغربى للأمريكتين الشمالية والجنوبية . ويوجد فى إقليم التمعدن هذا أكبر تركيز فى العالم من رواسب النحاس الحرمائية . وتكون الرواسب مصاحبة لصخور نارية متداخلة ذات نسيج بورفيرى ، ولذلك فإنها تسمى رواسب النحاس البورفيرى porphyry copper deposits ويعتقد أن الصخور النارية المتداخلة ، وبالتالى الرواسب المصاحبة لها ، قد تكونت نتيجة الاندساس subduction .

VI. الموارد اللافلزية

تعتبر الموارد اللافلزية موارد جيولوجية فى مجالات غير استخراج الفلزات أو كمصدر للطاقة ، وتحتوى معظم الصخور والمعادن على فلزات ، ولكن عندما يتم استخراج الموارد اللافلزية، فإنه يتم استخدام الصخر أو المعدن كما هو (مثل استغلال الرمل والحصى لأغراض البناء) ، بينما يتم استخراج الفلز فى الخامات الفلزية بعد إجراء بعض عمليات الفصل والتركيز . والموارد اللافلزية رخيصة الثمن عموماً ، ويتم استخدامها بكميات كبيرة، باستثناء الأحجار الكريمة



شكل (11.19): تتواجد رواسب نحاس مهمة (رواسب النحاس البورفيرى porphyry copper deposits) على امتداد الساحل الغربى للأمريكتين الشمالية والجنوبية .

(After Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd eedition. West Publishing Company, Minneapolis).

مثل الماس والياقوت. مما يعنى أن تلك الموارد يجب أن يتم استخدامها محليا ، نظراً لأن النقل لمسافات طويلة يضيف أعباء مالية على سعر الخام ، ومن أمثلة هذه الموارد مواد البناء والمخصبات والمتبخرات بالإضافة إلى بعض المواد الفلزية الأخرى .

أ. مواد البناء

يتم استخدام الرمل والحصى فى الخرسانة اللازمة لأعمال البناء وإنشاء الطرق السريعة . كما يستخدم الرمل أيضاً فى الملاط (المونة) اللازم للحم الطوب أو البلوكات الأسمنتية . وتعتبر الكثبان الرملية والأنهار ورواسب الشواطئ ضمن المصادر الرئيسية للرمل والحصى. كما تستخرج أيضا من المخاريط البركانية . ويستخرج الرمل والحصى من حفر سطحية تعرف بالمحاجر quarries .

ويشير مصطلح أحجار stones إلى الصخور التى تستخدم كبلوكات فى أعمال البناء مثل الجرانيت، وأيضا الحجر الجيرى المستخدم فى إنشاء الطرق. وتستخرج الأحجار من المحاجر أيضاً. ويستخدم الحجر الجيرى فى عدد من الأغراض إضافة إلى استخدامه فى البناء أو فى رصف الطرق، حيث يستخدم فى صناعة الأسمنت، كما يستخدم الحجر الجيرى المطحون فى تحسين مواصفات التربة، وكمكون رئيسى فى العديد من المنتجات الكيميائية.

ب- المخصبات والمتبخرات

تعتبر المخصبات fertilizers (مركبات الفوسفات والنيترات والبوتاسيوم) من أهم المواد اللازمة للزراعة فى الوقت الحالى ، حيث تنقل لمسافات طويلة عبر البحار نظراً لأهميتها. وينتج الفوسفات من الفوسفوريت phosphorite ، وهو صخر رسوبى يتكون من تراكم وتغير بقايا الكائنات العضوية. ويمكن أن تتكون النيترات ومركبات البوتاسيوم مباشرة بالتبخير.

ويستخرج الملح الصخرى rock salt الذى يتكون من معدن الهاليت من رواسب المتبخرات. ويستخدم الملح الصخرى فى حفظ الطعام والمساعدة فى إزالة الثلج من الطرق فى الأماكن الباردة فى الشتاء، وفى إعداد ملح الطعام وتصنيع حمض الهيدروكلوريك والصابون والعديد من المنتجات الأخرى. ويستخدم الملح الصخرى فى الصناعة على نطاق واسع . ويتكون الجبس gypsum أيضاً كأحد رواسب المتبخرات ، وهو أحد المكونات الرئيسية للجص والألواح الجدارية وفى صناعة البناء عموماً وغيرها من الاستخدامات الأخرى.

ويتواجد الكبريت sulfur فى حالة عنصرية فى رواسب صفراء زاهية. ويأتى معظم الكبريت المستخدم بصورة تجارية من الصخور المتواجدة فوق القباب الملحية. ويستخدم الكبريت بصورة كبيرة فى الزراعة كمبيد للفطريات وكمخصب. كما يستخدم فى تصنيع حمض الكبريتيك وإعداد الثقاب والعديد من المنتجات الأخرى.

جـ. المواد اللافلزية الأخرى

تشمل الأحجار الكريمة gemstones (وتسمى بعد تقطيعها وصقلها جواهر أو أحجار gems) الأحجار الثمينة مثل الماس diamond والياقوت rubies والزمرد emerald والسافير saphires ، بالإضافة إلى المعادن شبه الكريمة semiprecious stones مثل البريل والجارنت والسبينل والتوباز والزيركون. ويستخدم الماس فى أدوات الحفر ومناشير تقطيع الصخور.

والأسبستوس asbestos أحد أنواع السربنتين الموجود فى صورة ألياف يمكن فصلها ونسجها فى أقمشة واقية من النيران . ولذا فإنه يستخدم فى صناعة ملابس مكافحة النيران وستائر المسارح. كما يستخدم الأسبستوس فى صناعة العوازل الصوتية وعمل الأسقف ، على الرغم من تقلص استخدامه حالياً لارتباطه ببعض الأمراض الخبيثة فى الرئة. ويستخدم التلك talc الذى يوجد غالباً مصاحبا للأسبستوس فى صناعة بودرة التلك ومنتجات أخرى.

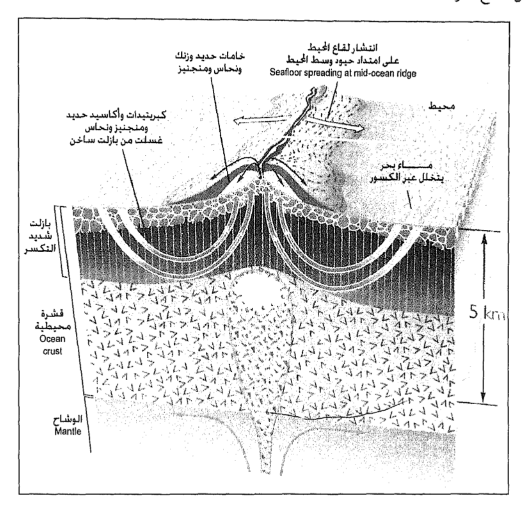
وتستخدم الموارد اللافلزية أيضا فى أغراض متنوعة؛ حيث تستخدم الميكا mica فى صناعة العوازل الكهربائية ، بينما يستخدم الباريت barite ($BaSO_4$) نظراً لوزنه النوعى العالى فى منع تدفق البترول أثناء عمليات الحفر. ويستخدم الصلصال clay فى صناعة السيراميك والمرشحات. ويستخدم الدياتوميت diatomites فى صناعة مرشحات أحواض السباحة وفى عمليات الترشيح عموماً . ورمال الزجاج glass sand التى تحتوى على أكثر من 95 ٪ من وزنها كوارتز هى المكون الرئيسى للزجاج ، ويستخدم الجرافيت graphite فى سبك المعادن وفى المواد المخففة للاحتكاك وصناعة الصلب والبطاريات وأقلام الرصاص.

VII. رواسب الخامات وتكتونية الألواح

تشرح نظرية تكتونية الألواح الأنواع المختلفة من النشاط النارى نتيجة التفاعلات عند حدود الألواح ، حيث تنفصل الألواح أو تتقارب . وحيث إن العمليات النارية تنقل العناصر الكيميائية والمعادن المتكونة فيها من داخل الأرض إلى سطحها، فإن نظرية تكتونية الألواح تقدم أساسًا مهمًّا لفهم نشأة الرواسب المعدنية. ويساعد هذا الفهم فى شرح أسباب تواجد رواسب الخامات الحالية ، كما يساعد فى عمليات الاستكشاف المعدنى .

فقد اكتشف الجيولوجيون عام 1979م وجود ينابيع حارة محملة بمعادن ذائبة تخرج من عدة مخارج على قاع البحر أثناء دراستهم لقاع المحيط عند مركز انتشار spreading center مرتفع شرق الهادئ East Pacific Rise . ويرجع أصل تلك الينابيع الحارة إلى ماء البحر الذى يدور فى الكسور بالقرب من الخسيف ، حيث تنفصل الألواح على امتداد حيود وسط المحيط (شكل 12.19). وترتفع درجة حرارة ماء البحر إلى عدة مئات من الدرجات حينما يلامس الصهارة أو الصخور الساخنة الموجودة فى أعماق القشرة . ويقوم ماء البحر الساخن بغسل وإزالة العناصر الشحيحة من الصخور الساخنة ويصعد إلى قاع البحر. وتترسب حبيبات دقيقة من كبريتيد الحديد وغيره من المعادن عندما تصل المياه الساخنة المحملة بالعناصر والمركبات الذائبة إلى القشرة العلوية الأكثر برودة ومياه المحيط القريبة . وهذا هو أصل المداخن السوداء black smokers الموضحة فى شكل (13.19). ويترسب بهذه الطريقة كميات كبيرة من كبريتيدات الخامات الغنية فى الزنك والنحاس والحديد والفلزات الأخرى ، على امتداد مراكز انتشار وسط المحيط .

وعندما تم تعرف مراكز الانتشار الشائعة فى البحار كمصدر للرواسب المعدنية، بدأ الجيولوجيون فى البحث فوق اليابسة عن بقايا قيعان البحار القديمة، التى ربما تحتفظ أيضا بموارد مهمة للرواسب المعدنية. وقد توجد بعض الرواسب فى نطاقات تصادم الألواح (الحدود المتقاربة) ، حيث قد توجد بعض أجزاء من قشرة محيطية قديمة دفعت فوق اليابسة، على امتداد أسطح دسر thrust surfaces فى مرحلة من مراحل

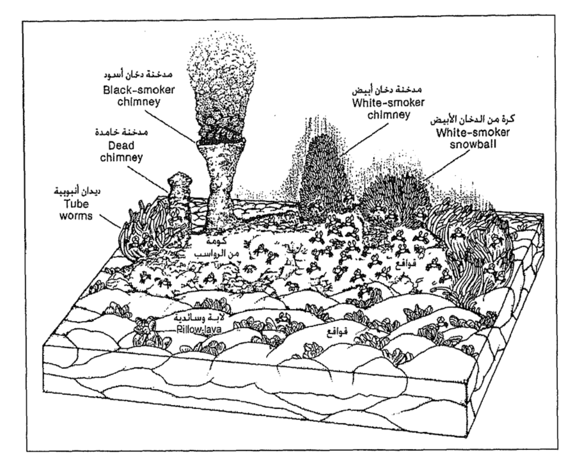


شكل (12.19) : يسخن ماء البحر البارد الذى يتخلل كسور الصخور البركانية عند حيود وسط المحيط، عندما يقترب من غرفة الصهارة المتواجدة أسفل حيود وسط المحيط . وتغسل السوائل الساخنة العناصر المختلفة من صخر البازلت وتصعد إلى قاع المحيط ، وعندما تخرج السوائل الساخنة مع ماتحمله من عناصر ذائبة إلى ماء قاع المحيط البارد ، ترسب المعادن الذائبة فى السوائل فى صورة كبريتيدات وأكاسيد غنية فى عناصر الحديد والزنك والنحاس وعناصر الخامات الأخرى .

(After Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York).

تصادم الألواح والاندساس تعرف بالأوفيوليت ophiolites. وربما يرجع أصل رواسب الكبريتيدات الغنية بالنحاس والرصاص والزنك فى تتابعات الأوفيوليت فى سلطنة عمان وقبرص والفلبين وإيطاليا وفى أماكن أخرى من العالم، إلى عملية دوران المياه الحرمائية على امتداد نطاقات خسف وسط المحيط القديم.

ويوجد عديد من رواسب خامات كبريتيدية أخرى يرجع أصلها إلى المحاليل الحرمائية أو النشاط النارى عند حدود تقارب (تصادم) حديثة أو قديمة. وتشمل تلك الرواسب تلك الموجودة فى كورديليرا فى أمريكا الشمالية والجنوبية وفى شرق البحر الأبيض المتوسط إلى باكستان ، وفى جزر الفلبين واليابان . ويلخص شكل (14.19) الارتباط بين بعض الرواسب المعدنية وتكتونية الألواح. ويعتقد أن الرواسب الموجودة فى الأقواس الصهارية magmatic arcs تنتج من نشاط نارى يقع فى نطاقات التقارب. وتقترح إحدى الفرضيات أن بعض رواسب حدود التقارب تمثل

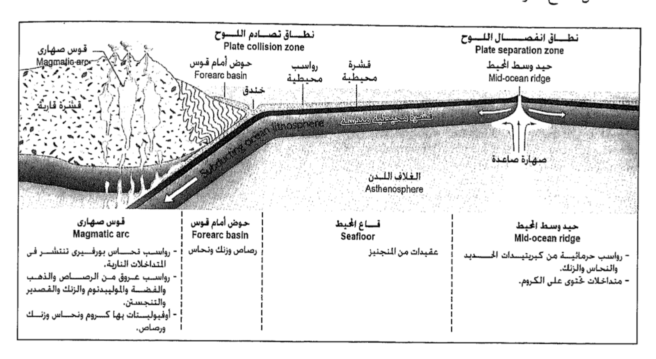


شكل (**13.19**): شكل نموذجى لرواسب الكبريتيدات الفلزية للكائنات الحية عند ينبوع ساخن تحت الماء على عمق 2500 متر على امتداد نطاق الخسف **rift zone** لمرتفع شرق الهادى **East Pacific Rise** ، وتنساب بعض هذه المياه الساخنة إلى سطح البحر عبر تراكيب تشبه المداخن مكونة الكبريتيدات وغيرها من المعادن ، والتى تترسب عندما تبرد المياه . ويقدم المدى الواسع من الظروف الكيميائية والحرارية تحت مستوى سطح البحر بيئات متنوعة للحياة .

(After Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York).

المرحلة الثانية من عملية تكون الخام التى تشمل مرحلتين. المرحلة الأولى هى نشأة خامات معدنية بواسطة نشاط حرمائى عند مركز انتشار وسط المحيط. وتشمل المرحلة الثانية، وهى منفصلة عن المرحلة الأولى زمانا ومكانا ، اندساس رواسب وقشرة محيطية تحتوى على عناصر الخامات التى سبق تركيزها عند نطاق تقارب (تصادم). وعندما يهبط اللوح فى مناطق الوشاح التى تزداد درجة حرارتها حيث تنصهر الفلزات وترتفع فى اللوح الراكب مصاحبة للصهارة. ويوجد الحديد والنحاس والموليبدنم والرصاص والزنك والقصدير والذهب على امتداد حدود الألواح المتقاربة ، والتى نشأت من النشاط الحرمائى ثم يعاد تركيزها بالعمليات النارية نتيجة حركات تكتونية الألواح.

وربما يكون قاع البحر البعيد عن حدود الألواح هو المكان الأفضل للتعدين فى مياه البحار العميقة، بسبب التواجدات المنتشرة لعقيدات المنجنيز manganese nodules ، وهى عقيدات هشة سوداء غير منتظمة الشكل تشبه حبات البطاطس تحتوى على أكاسيد المنجنيز ، وكميات أصغر من أكاسيد وهيدروكسيد



شكل (**14.19**): الدور الذى تلعبه حدود الألواح فى تراكم الرواسب المعدنية . تزيد نسبة الفلزات فى القشرة المحيطية والرواسب التى تغطيها نتيجة الترسب من المحاليل الحرمائية على امتداد حيود وسط المحيط . وتكون الصهارة الصاعدة فى نطاق الاندساس **subduction zone** مصدرًا للخامات التى تكون إقليم التمعدن الحزام الصهارى مثل الكورديليرا فى أمريكا الشمالية والجنوبية . وقد يساهم انصهار الرواسب والقشرة الهابطة المترسبة فى تكوين الخام ، وتندفع أجزاء القشرة المحيطية (أوفيوليتات) الحاملة للمعادن فوق القارة فى نطاق التصادم **collision zone** .

الحديد والنحاس والنيكل والكوبالت وأكاسيد فلزات أخرى. ويكون حجم العقيدات فى حدود عدة سنتيمترات قليلة. وتتكون تلك العقيدات من ترسيب أكاسيد تلك الفلزات من ماء البحر، حول نويات صغيرة مثل أسنان سمك القرش أو أجزاء من الصخر. ولا ترجع فقط القيمة الاقتصادية لتلك العقيدات إلى النقص التدريجي فى رواسب المنجنيز عالية التركيز على اليابسة ، وإنما إلى أن تلك العقيدات غنية أيضا بعدد من الفلزات الأخرى. وتقدر تلك الرواسب ببلايين الأطنان.

ويستعرض هذا الملخص الموجز لجيولوجية الرواسب المعدنية التنوع الكبير للمواقع الجيولوجية التى تحتوى على أنواع معادن مختلفة ذات قيمة اقتصادية. وعلى الرغم من أن هناك احتمالاً لانتشار أجسام خامات على قيعان البحار العميقة، إلا أن معظم رواسب الخامات توجد على القارات أو كبقايا لأجزاء متمعدنة من قشرة محيطية فوق القارات عند تقارب (تصادم) الألواح.

الملخص

1. الموارد الجيولوجية هى مواد مهمة ذات أصل جيولوجى ، تستخرج من الأرض وتشمل موارد الطاقة وموارد الفلزات والموارد اللافلزية .

2. الاحتياطيات هى الرواسب المكتشفة المعروفة التى يمكن استخراجها بطريقة اقتصادية وقانونية. أما الموارد الطبيعية فتشمل الاحتياطيات بالإضافة إلى الرواسب المكتشفة وغير المكتشفة بعد ، والتى يمكن استخراجها بصورة اقتصادية فى المستقبل.

3. يستخدم لفظ البترول كمصطلح عام يشمل الزيت الخام والغاز الطبيعى. ويتواجد البترول فى المناطق

التـي تتحقـق فيهـا ثلاثـة شروط ، وهـي: وجـود صخور مصدر يحتوى على مـواد عـضوية، حيـث يؤدى الدفن وتغـيرات مابعـد الترسيب إلى تكـون البـترول والنـضوج الحـراري، وصـخور خـزان ، ومصايد للزيت (مثل الطيـات المحدبـة والـصدوع والمصايد الاستراتجرافية والقباب الملحية) .

4. قد يحل الغاز الطبيعى والخام الثقيل ورمـل الزيـت وطفل الزيت محل البترول السائل فى المستقبل.

5. يعتبر الفحم أحد مصادر الطاقة الرئيسية بعد الزيت والغاز الطبيعى. ويستخدم الفحـم حاليـا فى توليـد الكهربـاء، وقـد يزيـد اسـتخدامه فى المـستقبل مـع ارتفاع أسعار البترول.

6. توجد الخامات الفلزية ، والتى يمكـن اسـتخراجها من الرواسـب المعدنيـة بـصورة مربحـة، مـصاحبة للـصخور الناريـة ، والرواسـب المنثـورة ورواسـب النابيع الحارة المتواجدة فوق سطح الأرض وتحـت الماء . ويتجمع عديد مـن المعـادن المهمـة اقتـصاديا بواسطة الانصهار الجزئى والتبلور التجزيئى ، وهى عمليات صهارية ، بالإضافة إلى العمليات الرسوبية والتحولية.

7. تتكون رواسب الركيزة (المكيـث) نتيجـة تركيزهـا ميكانيكا من المجارى المائية بسرعة أكبر من المعادن الأخف ، بينما تتكـون الرواسـب المعدنيـة المتبقيـة نتيجة التجويـة الكيميائيـة وإزالـة المـواد الذائبـة فى المحلول ، مما يؤدى إلى تركيز المعادن المتبقيـة الأقـل ذوبانا. وتعتبر اللاتيريت والبوكسيت من أهم أمثلة الرواسب المعدنية المتبقية.

8. تتكون الخامات الفلزية مـن الينـابيع الـساخنة عنـد حدود الألـواح المتباعـدة، وعـلى جوانـب أقـواس الجـزر ، وفى أحزمـة عنـد حـواف القـارات فـوق نطاقات الاندساس .

9. الفلزات أحد العناصر الرئيسية المهمة فى الـصناعة، خاصـة الحديـد لإنتـاج الـصلب والنحـاس للتجهيزات والمعدات الكهربية.

10. تستخدم الموارد اللافلزية مثـل الرمـل والحـصباء والحجر الجيرى بكميات كبيرة. كما تستخدم أيضاً المخصبات والملح الصخرى والجبس والكبريـت والصلصال على نطاق واسع .

مواقع على شبكة المعلومات الدولية (الإنترنت)

http://minerals.er.usgs.gov/
http://www.doe.gov/
http://energy.usgs.gov/
http://www.smenet.org/opaque-ore/
http://dir.yahoo.com/Science/Engineering/Mining/

المصطلحات المهمة

asphalt	أسفلت (زفت)	natural gas	غاز طبيعى
bauxite	بوكسيت	oil field	حقل بترول
brine	أجاج (ماء ملح مر)	oil pool	تجمع زيتى
crude oil	زيت خام	oil sands	رمال الزيت
disseminated mineral deposits	الرواسب المعدنية المنثورة	oil shale	طفل الزيت
exploration geology	جيولوجيا الاستكشاف	oil trap	مصيدة بترول
fission	انشطار	ore	خام (ركاز)
gangue	غث	pegmatites	بجماتيت
geologic resources	موارد جيولوجية	petroleum	بترول
grade	رتبة(مستوى التركيز)	placer	ركيزة (مرقد)
heavy crude	خام ثقيل	porphyry copper deposit	راسب نحاس بورفيرى
hot spring	ينابيع حارة	rank	رتبة (فحم)
hydrothermal mineral deposit	راسب معدنى حرمائى	reserves	احتياطيات
hydrothermal solutions	محاليل حرمائية	reservoir rock	صخر خزان
laterite	لاتيريت	residual mineral deposit	راسب معدنى متبقٍ
magmatic mineral deposit	راسب معدى صهارى	resources	موارد
metallogenic province	إقليم تمعدن	source rock	صخر مصدر
migration	هجرة	stratabound	مقيد الطباقية
mineral deposit	راسب معدنى	volcanogenic massive sulfide deposit	رواسب الكبريتيد الكتلية بركانية النشأة

الأسئلة

1- اذكر المجموعات الرئيسية للموارد الجيولوجية. اذكر أمثلة لكل مجموعة .

2- ما الشروط الجيولوجية الضرورية لتراكم الزيت والغاز الطبيعى؟

3- قارن بين الاحتياطيات والموارد. هل يمكن أن تزداد الاحتياطيات؟ وهل يمكن أن تزداد الموارد؟

4- تتميز رواسب طفل الزيت بأنها غنية فى المواد العضوية. اشرح لماذا لايستخدم طفل الزيت كمصدر للبترول.

5- لقد أوضحت عمليات حفر آبار الزيت، أن البترول فى كل وحدة حجم من الصخور من حقب الحياة الحديثة أكبر من ذلك الموجود فى صخور حقب الحياة القديمة من النوع نفسه. اشرح .

6- ما الوقود الحفرى؟ اذكر أربعة أنواع من الوقود الحفرى.

7- هل يتكون الفحم بالاستقرار البلورى أو بالعمليات الحرمائية أو بضغط المواد النباتية أو فوق قاع المحيط ؟

8- تتواجد الرواسب المعدنية الفلزية فى ثلاثة فقط من الأوضاع التكتونية الأربعة التالية : (أ) حيود وسط المحيط، (ب) أقواس الجزر ، (جـ) نطاقات الإندساس،(د) بلومات الوشاح حددها .

9- ما الرواسب المعدنية؟ اذكر طريقتين يمكن أن يتكون بهما راسب معدنى.

10- اذكر نوعين رئيسيين من الرواسب الحرمائية .

11- اذكر الخام الرئيسى للألومنيوم وطريقة تكونه .

12- ما العوامل التى تحدد ما إذا كان الراسب المعدنى خامًّا أم لا؟

13- ما العوامل التى تسبب تركيز المعادن فى رواسب المكيث؟. اذكر أربعة معادن يمكن استخراجها من تلك الرواسب .

الـمــلاحــق

ملحــق (أ) : البادئات واللاحقات والجذور الشائعة الاستخدام[2،1]

abyss	عميق	mega-	كبير، ضخم
alluvium	ترسب بماء سطح جارى	meso-	منتصف، أوسط
anti-	مضاد . معاكس	meta-	تغير ، تحول
archea- (archaeo)-	قديم	micro-	صغير، دقيق، ومع اسم الصخر تدل على أنه متوسط التموضع
astheno-	ضعيف، ينقصه الشدة	-morph	شكل
bi-	ثنائى، مزدوج	oid-	شبيه، له نفس الشكل
ceno	حديث	ortho-	مستقيم، متعامد، وعندما تسبق اسم صخر متحول تعنى اشتقاقه من صخر نارى
circum-	دائرى ، حول	paleo-	قديم ، من أزمنة ماضية
clast	مكسور	para-	عندما تسبق اسم صخر متحول تعنى أنه ناتج عن تحول صخر رسوبى
-cline	منحدر ، مائل	ped-	قدم، أسفل
de-	أدنى، يخفض، يزيل	pelagic	متعلق بالمحيط
dis-	انفصال، متعارض مع	peri-	حول، قريبا من
endo-	داخل، بداخل	petro-	حجر أو صخر
epi-	على، فوق، تال	phanero-	واضح، مرئى
eu-	جيد، جيد التكوين	pheno-	ظاهر، كبير
ex-	خارج، بعيدا عن ، بدون	pluto-	تكون تحت أعماق كبيرة (إله الرومان تحت سطح الأرض)
exo-	خارجى، خارج عن	pre-	قبل
feld	حقل	proto-	أولى، ابتدائى، بدائى
folium	ورقة	pyro-	نار
geo-	الأرض	spar	مادة متبلورة
glomero-	تجمع	-sphere	كرة
hetero-	مختلف، مغاير	stria	حز صغير، شريط
holo-	بالكامل، تماما	sub-	تحت، أقل من، دون
homo-	مماثل تماما	super-	فوق، أكبر من، بالإضافة إلى
hyalo-	زجاجى	syn-	سويا، فى نفس الوقت
hyper-	كثير جداً، فوق المعتاد	tecto-	تعنى بناء فى اليونانية وتعنى فى الجيولوجيا حركة أو تراكيب بسبب قوى داخلية
hypo-	تحت ، دون ، تقريبًا	terra, terre	يتعلق بالأرض
hydro-	ماء	tri-	ثلاثة، ثلاثى
iso-	تساوى ، مساو	ultra-	فوق، وراء
kata-	أسفل، تحت، أقصى عمق	vitr-	زجاجى
-lith, lith-	حجر أو صخر	xeno-	غريب
macro-	كبير، عظيم	zoo, zoic-	حيوان

(1) البادئة prefix هى مقطع يوضع فى بدء كلمة أخرى لتغيير معناها أو لتكوين كلمة جديدة ، أما اللاحقة suffix فهى مقطع يضاف إلى آخر الكلمة لتغيير معناها أو لتكوين كلمة جديدة ، أما الجذر root فهو أصل أو مصدر لكلمة.

(2) مجمعة من whitlen , D.G.A. and Brooks , J.R.V. , 1973. The Penguin Dictionary Geology. Penguin Books, England.

-Plummer, C.C, McGeary, D., and Carlson, D.H., 2001, Physical Geology, McGraw Hill, Boston .

- حسين، عبد العزيز عبد القادر، معجم المصطلحات الجيولوجية، 1999م، مركز النشر العلمى – جامعة الملك عبد العزيز ، جدة .

ملحـــق (ب): العناصر الأكثر أهمية فى الجيولوجيا مرتبة أبجديا

العنصـــــر	الرمز	الرقم الذري	العنصـــــر	الرمز	الرقم الذري
Aluminum ألومنيوم	Al	13	Neon نيون	Ne	10
Antimony أنتيمون	Sb	51	Nickel نيكل	Ni	28
Argon أرجون	Ar	18	Niobium نيوبيوم	Nb	41
Arsenic زرنيخ	As	33	Nitrogen نيتروجين	N	7
Barium باريوم	Ba	65	Oxygen أكسجين	O	8
Beryllium بريليوم	Be	4	Phosphorus فوسفور	P	15
Bismuth بزموث	Bi	83	Platinum بلاتين	Pt	78
Boron بورون	B	5	Plutonium بلوتونيوم	Pu	94
Bromine بروم	Br	35	Polonium بولونيوم	Po	84
Cadmium كادميوم	Cd	48	Potassium بوتاسيوم	K	19
Calcium كالسيوم	Ca	20	Praseodymium براسيوديميو	Pr	59
Carbon كربون	C	6	Promethium بروميثيوم	Pm	61
Cerium سريوم	Ce	58	Protactinium بروتكتينيوم	Pa	91
Cesium سزيوم	Cs	55	Radium راديوم	Ra	88
Chlorine كلور	Cl	17	Radon رادون	Rn	86
Chromium كروم	Cr	24	Rubidium روبيديوم	Rb	37
Cobalt كوبالت	Co	27	Samarium سماريوم	Sm	62
Copper نحاس	Cu	29	Scandium سكانديوم	Sc	21
Dysprosium ديسبروزيوم	Dy	66	Silicon سيليكون	Si	14
Erbium إربيوم	Er	68	Silver فضة	Ag	47
Europium يوروبيوم	Eu	63	Sodium صوديوم	Na	11
Flourine فلور	F	9	Strontium استرونشيوم	Sr	38
Gadolinium جادولينوم	Gd	64	Sulfur كبريت	S	16
Gallium جاليوم	Ga	31	Tantalum تنتالوم	Ta	73
Germanium جرمانيوم	Ge	32	Tellurium تلوريوم	Te	52
Gold ذهب	Au	79	Terbium تربيوم	Tb	65
Helium هيليوم	He	2	Thorium ثوريوم	Th	90
Holmium هولميوم	Ho	67	Thulium ثوليوم	Tm	69
Hydrogen هيدروجين	H	1	Tin قصدير	Sn	50
Iron حديد	Fe	26	Titanium تيتانيوم	Ti	22
Lanthanum لانثانوم	La	57	Tungsten تنجستن	W	74
Lead رصاص	Pb	82	Uranium يورانيوم	U	92
Lithium ليثيوم	Li	3	Vanadium فناديوم	V	23
Lutetium لوتيتيوم	Lu	71	Xenon زينون	Xe	54
Magnesium ماغنسيوم	Mg	12	Ytterbium إتربيوم	Yb	70
Manganese منجنيز	Mn	25	Yttrium إتريوم	Y	39
Mercury زئبق	Hg	80	Zinc زنك	Zn	30
Molybdenum موليبدينوم	Mo	42	Zirconium زركونيوم	Zr	40
Neodymium نيوديميوم	Nd	60			

ملحق (ج) : مقارنة بعض الوحدات المترية والإنجليزية

Units الوحدات

kilometer (km 1)	=	meters (m 1000)
meter (m 1)	=	centimeters (cm 100)
centimeter (cm 1)	=	inch (in 0.39)
mile (mi 1)	=	feet (ft 5280)
foot (ft 1)	=	inches (in 12)
inch (in 1)	=	centimeters (cm 2.54)
square mile (mi^2)1	=	acres (a 640)
kilogram (kg 1)	=	grams (g 1000)
pound (Ib 1)	=	ounces(oz 16)
fathom 1	=	feet (ft 6)

Conversions التحويلات

عندما تريد تحويل وحدات العمود الأول إلى ما يقابلها فى العمود الثالث اضرب فى الأرقام المقابلة فى العمود الثانى

Length الطول

inches	بوصات	2.54	centimeters	سنتيمترات
centimeters	سنتيمترات	0.39	inches	بوصات
feet	قدم	0.30	meters	أمتار
meters	أمتار	3.28	feet	قدم
yards	ياردات	0.91	meters	أمتار
meters	أمتار	1.09	yards	ياردات
miles	أميال	1.61	kilometers	كيلومترات
kilometers	كيلومترات	0.62	miles	أميال

Masses and Weights الكتل والأوزان

ounces	آونوسات	28.35	grams	جرامات
grams	جرامات	0.035	ounces	آونسات
pounds	أرطال انكليزية	0.45	kilograms	كيلو جرامات
kilograms	كيلو جرامات	2.205	pounds	أرطال انكليزية

ملحق (د) : تعرف المعادن

يتميز كل معدن بمجموعة من الصفات الفيزيائية والكيميائية يستخدم فى تحديدها أجهزة وتقنيات متخصصة. ويمكن التمييز بين معظم المعادن الشائعة باستخدام بعض الاختبارات البسيطة . فخاصية الانفصام cleavage من الخواص المميزة والمفيدة التى يلزم فيها تحديد عدد أسطح الانفصام والزاوية المحصورة بين اتجاهات الانفصام ونوع كل اتجاه من هذه الاتجاهات . ومن الاختبارات البسيطة أيضا الصلادة hardness (ويرمز لها اختصاراً بالرمز H) والبريق luster واللون color وهيئة البلورة crystal form – إذا كانت موجودة. كما يمكن إجراء اختبارات كيميائية بسيطة أيضا باستخدام حامض الهيدروكلوريك المخفف لملاحظة هل يحدث فوران للمعدن أم لا.

ويمكن استخدام جداول التعريف هنا لتميز معظم المعادن الشائعة المكونة للصخور ، وبعض أهم معادن الخام (الركاز) الشائعة . ولتعرف المعادن الأقل شيوعاً ، يمكن الرجوع إلى أحد المراجع المتخصصة . ويحتاج تعرف المعادن إلى بعض التمرين والخبرة .

ويحتم تعرف المعادن المكونة للصخور الشائعة ضرورة وجود دليل بسيط يسهّل تعرفها . ويتضمن هذا الدليل تحديد ماإذا كانت صلادة المعدن أكثر أو أقل من الزجاج ، ثم متابعة تعرف الصفات الأخرى التى تؤدى إلى التعرف على المعدن . ويمكن التحقق من دقة تعرف المعدن بالرجوع إلى الصفات الأخرى للمعدن والموضحة فى جدول (1. أ) .

وتكون معادن الركاز مميزة عادة ولا تحتاج عموماً لدليل . ولتعرف معدن ركاز معين ، يتم تتبع صفاته فى جدول (2. أ) ، وتحديد مجموعة الصفات التى تتطابق مع المعدن المجهول المراد التعرف عليه.

دليل لتعريف المعادن المكونة للصخور الشائعة

يتم تحديد ما إذا كان سطح المعدن المكشوف حديثاً أكثر أو أقل صلادة من الزجاج . فإذا كان المعدن لا يخدش باستخدام نصل سكين فإنه يكون أكثر صلادة من الزجاج ، أما إذا كان من الممكن خدش المعدن باستخدام نصل سكين ، فإن المعدن يكون أقل صلادة من الزجاج . وتوضح الخطوات التالية طريقة تعرف المعادن الشائعة .

I- المعدن أكثر صلادة من الزجاج

نفحص خاصية الانفصام فى المعدن ، فإذا كان الانفصام غير موجود ، تابع ما يلى ، أما إذا كان يوجد بالمعدن انفصام تابع فى ب .

أ. المعدن لايوجد به انفصام:

1- البريق زجاجى vitreous luster

– لون أخضر زيتونى أو بنى – أوليفين olivine.

– بنى محمر أو فى بلورات متساوية الأبعاد بها اثنا عشر وجهاً أو أكثر– جارنت garnet

- لون فاتح عادة أو شفاف – كوارتز quartz.

2 - بريق فلزى metallic luster

- أصفر زاهٍ – بيريت pyrite

3 - شحمى أو شمعى

- أخضر أو أسود مرقط – سربنتين serpentine

ب – المعدن به انفصام : حدد عدد اتجاهات الانفصام فى البلورة أو فى حبة معدن واحدة .

1– اتجاهان جيدان good متقاطعان عند أو قريبا من 90°- فلسبار feldspar.

- إذا كان يمكن رؤية الحزوز على أسطح الانفصام- بلاجيوكليز plagioclase

- إذا كان اللون قرنفليًا أحمر ورديًا أو قرنفليًا ضاربًا للصفرة – فلسبار بوتاسى (أو أورثوكليز) potassic feldspar .

- إذا كان أبيض أو رماديًا فاتحًا دون حزوز، فإنه قد يكون أحد نوعى الفلسبار.

2- اتجاهان واضحان fair متقاطعان عند 90°.

-أخضر غامق إلى أسود – بيروكسين (عادة أوجيت augite)

3- اتجاهان ممتازان excellent، ولكن التقاطع أكبر أو أقل من 90°.

- أخضر غامق إلى أسود – أمفيبول (عادة هورنبلند hornblende) .

II المعدن أقل صلادة من الزجاج

أ. لا يوجد انفصام بالمعدن

1- بريق أرضى earthy luster وفى كتل دقيقة جداً لا يمكن تمييز الحبيبات المفردة – مجموعة مادة الصلصال (مثل معدن الكاولينيت kaolinite)

ب - يوجد انفصام بالمعدن

1- اتجاه واحد

- انفصام كامل يكوّن شرائح مرنة – ميكا

- أبيض أو شفاف – ميكا مسكوفيت muscovite.

- أسود أو بنى داكن – ميكا بيوتيت biotite .

2- ثلاثة اتجاهات

- الاتجاهات الثلاثة كلها كاملة perfect وتتقاطع عند 90° (انفصام مكعبى)

- هاليتhalite

- الاتجاهات الثلاثة كلها كاملة ولكن لا تتقاطع عند 90 ° أو قريباً من ذلك.

- يحدث فوران للمعدن فى الحامض المخفف – كالسيت calcite.

- يحدث فوران لمسحوق المعدن فى الحامض المخفف–دولوميت dolomite

جدول (1): الخواص المميزة للمعادن الشائعة المكونة للصخور

الاسم (كتبت أسماء المجموعات المعدنية باللون الأسود)	التركيب الكيميائى	البناء البلورى والمجموعة الكيميائية	الخواص المميزة	الخواص الأخرى
أمفيبول **amphibole** (مجموعة معدنية يكون فيها الهورنبلند هو المعدن الأكثر شيوعا)	$XSi_8O_{22}(OH)_2$) (X خليط من Ca, Na, Fe, Mg, Al)	سيليكات - سلاسل مزدوجة	انفصام منشورى كامل ، يتقاطع مستويا انفصام بزوايا تقرب من 60° و (120°) .	الصلادة=5-6 لون الهورنبلند أخضر غامق إلى أسود؛ يميل إلى تكوين بلورات إبرية أو مستطيلة؛ له بريق زجاجى.
أوجيت **augite** (انظر البيروكسين)				
بيوتيت **biotite** (انظر الميكا)				
كالسيت **calcite**	$CaCO_3$	كربونات	انفصام معينى الأوجه (ثلاثة مستويات انفصام ممتازة توازى الأوجه) الصلادة = 3. يتفاعل بشدة مع الحمض المخفف.	أبيض أو رمادى أو عديم اللون ؛ بريق زجاجى ، بلورات شفافة لها انكسار مزدوج.
معادن الصلصال **clay minerals** (الكاولينيت أحد المعادن الشائعة فى هذه المجموعة المعدنية الكبيرة)	يشمل التركيب $XSi_4O_{10}(OH)_8$) X عبارة عن Mg,, Al, (Ca, Na, Fe, K	سيليكات صفائحية	بلورات ميكرسكوبية عموما، كتل معادن الصلصال أكثر رخاوة من ظفر الإصبع . بريق أرضى . له رائحة الطين عندما يبلل بالماء .	يبدو أنه ينتج عن التجوية الكيميائية للفلسبارات وغيرها من معادن السيليكات، وهو مكون لمعظم أنواع التربة.
الدولوميت **dolomite**	$CaMg(CO_3)_2$	كربونات	مماثل للكالسيت (انفصام معينى الأوجه، الصلادة = 3) يتفاعل مسحوق المعدن مع الحمض الخفيف .	عادة أبيض أو رمادى أو عديم اللون ، بريق زجاجى.
فلسبار **feldspar** (مجموعة شائعة من المعادن) وتشمل هذه المجموعة:	سيليكات إطارية	سيليكات إطارية	الصلادة = 6 (يخدش الزجاج) . مستويا انفصام يفصلها زاوية قدرها 90°.	بريق زجاجى ، لكن السطح قد يتجوى إلى طفل مما يعطيه بريقًا أرضيا . البلورة الكاملة تأخذ شكل صندوق طولى .
فلسبار بوتاسى (أورثوكليز)	$KAlSi_3O_8$		أبيض أو وردى أو لون السلمون .	لايحتوى على أى تخطيط على أسطح الانفصام .

(يتبع) :

الاسم (كتبت أسماء المجموعات المعدنية باللون الأسود)	التركيب الكيميائى	البناء البلورى والمجموعة الكيميائية	الخواص المميزة	الخواص الأخرى
بلاجيوكليز **plagioclase**	سلسلة من المعادن تتراوح فى التركيب بين الأنورثيت والألبيت $CaAl_2Si_2O_8$ و$NaAlSi_3O_8$		أبيض أو رمادى فاتح إلى غامق ، ونادرا ماتكون هناك ألوان أخرى ، قد يحتوى على حزوز striation على أسطح الانفصام .	تكون الأنواع الغنية بالكالسيوم ذات لون رمادى أغمق ، كما قد يظهر تلاعب بالألوان play of colours.
جارنت **garnet**	$XSiO_4$ (X عبارة عن خليط من Ca, Mg, Fe, Al, Mn)	سيليكات مفردة	لايوجد انفصام.بنى محمر عادة . يميل إلى أن يأخذ شكل بلورات كاملة متساوية الأبعاد ،عادة 12 وجها. الصلادة= 7.	نادرا أصفر أو أخضر أو أسود. يوجد عادة فى الصخور المتحولة ، بريق زجاجى .
جبس gypsum	$CaSO_4.2H_2O$	كبريتات	الصلادة=2. اتجاه انفصام واحد واضح واتجاهين آخرين كاملين . بريق زجاجى أو حريرى.	ألوانه تتراوح بين الواضح والأبيض والباستيل . وتكون الحبيبات المنفصمة مرنة
هاليت halite	NaCl	هاليدات	انفصام مكعبى (3 مستويات تتقاطع عند زوايا قدرها 90°)، الصلادة=2.5. له مذاق ملحى. يذوب فى الماء.	عادة شفاف إلى أبيض .
هيماتيت **hematite** (انظر جدول معادن الخامات)				
هورنبلند **hornblende** (انظر الأمفيبول)				
كاولينيت **kaolenite** (انظر الصلصال)				
ميكا **mica** (تشمل هذه المجموعة):	$K(X)(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	سيليكات صفائحية	مستوى انفصام واحد (يتكسر بسهولة إلى صفائح مرنة) .	الصلادة = 2-3 . بريق زجاجى
بيوتيت **biotite**	(X عبارة عن Mg, Fe, Al		أسود أو بنى غامق.	

(يتبع) :

الاسم (كتبت أسماء المجموعات المعدنية باللون الأسود)	التركيب الكيميائى	البناء البلورى والمجموعة الكيميائية	الخواص المميزة	الخواص الأخرى
مسكوفيت muscovite	(X عبارة عن Al)		أبيض أو شفاف	
أوليفين olivine	X_2SiO_4 (X عبارة عن Fe, Mg)	سيليكات مفردة	لايوجد انفصام . لونه أخضر زيتونى أو بنى . الصلادة = 6-7 . البريق زجاجي .	يوجد كحبيبات صغيرة فى الصخور النارية المافية والفوقالمافية .
أورثوكليز orthoclase (انظر الفلسبار)				
بلاجيوكليز (انظر الفلسبار)				
بيريت pyrite (الذهب الكاذب)	FeS_2	كبريتيد	الصلادة=6 (يخدش الزجاج) . بريق لامع أو أصفر أو معدنى . مخدش أسود .	يوجد عادة كبلورات كاملة مكعبية الشكل أو لها خمسة أوجه . يتجوى إلى لون بني .
بيروكسين pyroxene (مجموعة معدنية الأوجيت أهم معادنها)	$XSiO_3$ (X عبارة عن Fe, Mg, Al, Ca)	سيليكات -سلاسل مفردة	مستويا انفصام يتقاطعان بزوايا تقرب من 90°.	الصلادة = 6. الأوجيت لونه أخضر غامق إلى أسود . البريق زجاجى . بلورات قصيرة وغليظة .
كوارتز quartz	SiO_2	سيليكات إطارية	الصلادة=7. لايوجد انفصام. بريق زجاجي . لايتجوى إلى صلصال .	أى لون ، ولكن عادة يكون عديم اللون أو أبيض أو شفافًا . بلورات جيدة لها ستة أوجه منشورية على هيئة أعمدة لها هرم معقد على قمتها .
سربنتين serpentine	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	سيليكات صفائحية	تختلف الصلادة ، ولكنه يكون أقل صلادة من الزجاج. لونه أخضر مبرقش أو أسود . بريق شحمى . يتكسر على امتداد أسطح ملساء منحنية .	أحيانا ليفى (الأسبستوس asbestose)

جدول (2): الخواص المميزة لمعادن الخامات الشائعة

الاسم	التركيب الكيميائي	الخواص المميزة	الخواص الأخرى
أزوريت	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$	اللون أزرق سماوى؛ يخرج فقاقيع فى الحامض المخفف .	الصلادة=3-4
بوكسيت	$Al_2O_3.nH_2O$	له بريق أرضى. نوع من الصلصال . كرات فى حجم حبيبات البسلة فى أرضية دقيقة الحبيبات.	
بورنيت	$CuFeS_4$	بريق فلزى. لون معتم إلى أرجوانى قزحى .	مخدش رمادى ؛ الصلادة= 3 (أقل صلادة من الزجاج)
كالكوبيريت	$CuFeS_2$	بريق فلزى. أصفر نحاسى . أقل صلادة من الزجاج.	مخدش أسود.
سنبار	HgS	اللون أحمر فاتح إلى حمر قرمزى .	أقل صلادة من الزجاج. بريق أرضى عادة.
جالينا	PbS	بريق معدنى، رمادى ؛ ثلاث مستويات انفصام يفلصها زاوية °90 (مكعب) . كثافة نوعية كبيرة.	أقل صلادة من الزجاج. مخدش رمادى.
ذهب	Au	بريق معدنى،أصفر؛ الصلادة=3 (أقل صلادة من الزجاج، يتكسر إلى راقات رقيقة، ويسهل تشويهه)	مخدش أصفر؛ كثافة نوعية عالية .
هاليت	NaCl	مذاق ملحى؛ 3 مستويات انفصام تتقاطع عند °90 (انفصام مكعبى) .	شفاف أو أبيض؛ يذوب بسهولة فى الماء .
هيماتيت	Fe_2O_3	مخدش أحمر- بنى .	كتل حمراء أو بلورات أو رقائق لونها معدنى أو فضى.
ليمونيت	$Fe_2O_3.nH_2O$	بريق أرضى ؛ مخدش أصفر- بنى .	لونه أصفر إلى بنى ؛ أقل صلادة من الزجاج.
ماجنيتيت	Fe_3O_4	بريق معدنى، أسود؛ مغناطيسى.	أصلد من الزجاج.مخدش أسود.
مالاكيت	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$	لونه ولون مخدشه فاتح-أخضر	أقل صلادة من الزجاج؛ يخرج فقاقيع مع الحامض المخفف .
سفاليرايت	ZnS	لونه بنى إلى أصفر؛ ست مستويات انفصام .	بريق صمغى ؛ مخدش أصفر أو كريمى؛ أقل صلادة من الزجاج.
تلك	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	أبيض أو رمادى أو أخضر ؛ الصلادة = 1 (أقل صلادة من ظفر الإصبع) .	ملمس شحمى .

قائمة ببعض المراجع المختارة

أولا. المراجع العربية

حلمى ، محمد عز الدين ، 2002 : علم المعادن ، الطبعة السابعة ، مكتبة الأنجلو المصرية ، القاهرة ، 486 صفحة .

سعيد ، رشدى ، 1993 : نهر النيل : نشأته واستخدام مياهه فى الماضى والمستقبل . دار الهلال ، القاهرة ، 342 صفحة .

معجم الجيولوجيا ، الطبعة الثانية ، مجمع اللغة العربية ، القاهرة ، 643 صفحة .

تاربوك ، إدوارد جى ، ولوتجنز ، فريدريك ، ك. ، 1989 : الأرض : مقدمة للجيولوجيا الطبيعية ، ترجمة حمودة ، عمر سليمان واليعقوبى ، البهلول على و سالم ، مصطفى جمعة ، منشورات مجمع الفاتح للجامعات ، ليبيا ، 643 صفحة .

حسن ، محمد يوسف ، شريف ، عمر حسين ، والنقاش ، عدنان باقر ، 1983 : أساسيات علم الجيولوجيا . جون وايلى وأولاده ، نيويورك ، 550 صفحة .

حسين ، عبد العزيز عبد القادر ، 1999 : معجم المصطلحات الجيولوجية . مركز النشر العلمى ، جامعة الملك عبد العزيز ، جدة ، المملكة العربية السعودية ، 387 صفحة .

فرج ، إبراهيم عبد القادر ، 2000 : قاموس مصطلحات علوم الأرض (انجليزى – عربى) . جامعة الملك عبد العزيز ، جدة ، المملكة العربية السعودية ، 1841 صفحة (جزءان) .

فوستر ، روبرت ج. ، 1980 : الجيولوجيا العامة ، ترجمة : عبد القادر عابد ، شاكر المقبل وسعد الباشا ، منشورات مجمع اللغة العربية الأردنى ، 792 صفحة .

مشرف ، محمد عبد الغنى وإدريس ، الطاهر عثمان ، 1990 : قاموس مصطلحات الرسوبيات المصور . عمادة شئون المكتبات – جامعة الملك سعود – الرياض ، المملكة العربية السعودية ، 243 صفحة .

ثانيا. المراجع الأجنبية

Abbott, P. L., 1999: Natural Disasters. 2nd edition. WCB/McGraw Hill, Boston, 397p.

Compton, R. R., 1962: Manual of Field Geology. John Wiley and Sons, Inc., New York, 378 p.

Decker, R. and Decker, B., 1997: Volcanoes. 4th edition. W. H. Freeman and Company, New York. 321p.

Embabi, N. S., 2004: The Geomorphology of Egypt: Landforms and Evolution, vol. 1. The Egyptian Geographic Soc., Cairo, 447p.

Ernst, W.G. (Editor), 2000: Earth Systems: Processes and Issues. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 566p.

Fritz, W. J. and Moore, J. N., 1988: Basics of Physical Stratigraphy and Sedimentology. John Wiley and Sons, Inc., New York, 371p.

Gass, I. G., Smith, P. J. and Wilson, R.C.L. (Editors), 1977: Understanding the Earth, 2nd edition. The Open University Press, Sussex, 383p.

Hamblin, W.K., 1985: The Earth's Dynamics Systems, 4th edition. Burgess Publishing, Minneapolis, 528p.

Holmes, D.L., 1984: Holmes Principles of Physical Geology, 3rd edition. The English Language Book Society and Nelson, Great Britain, 730p.

Longwell, C. and Flint, R.F., 1962. Introduction to Physical Geology, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 504p.

Lowrie, W. L., 2000: Fundamentals of Geophysics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 354p.

Monroe, J.S. and Wicander, R., 1995: Physical Geology, 2nd eedition. West Publishing Company, Minneapolis, 626p.

Plummer, C.C., McGeary, D., and Carlosn, D. H., 2001: Physical Geology, 4th edition. McGraw Hill, Boston, 578p.

Press, F. and Siever, R., 1998: Understanding Earth, 2nd edition. W. H. Freeman and Company, New York. 682p.

Said, R. (Editor), 1990: The Geology of Egypt. Balkama, Rotterdam, 734p.

Said, R. (Editor), 1993: The River Nile: Geology, Hydrology and utilization. Bergman Press, Oxford, 320p.

Skinner, B.J. and Porter, S.C., 2000: The Dynamic Earth, 4th edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 575p.

Strahler, A. and Strahler, A., 1999: Introducing Physical Geography, 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 616p.

Tarbuck, E.J. and Lutgens, F.K., 2002: The Earth: An introduction to Physical Geology, 7th edition. Macmillan Publishing Company, New York, 605p.

الدليـــــل

يشمل هذا الدليل أهم الكلمات التى وردت فى الكتاب وأهم الصفحات التى وردت بها.

الياردنجات قد حفرت بسبب تعرية الرياح التى تكون محملة بالرماد والغرين .

Z

Zeolite **زيوليت**

طائفة من معادن السيليكات ، تحتوى على الماء فى تجاويف فى البناء البلورى ، تتكون نتيجة تحول أنواع أخرى من السيليكات (غالبا زجاج بركانى) عند درجة حرارة وضغط منخفض.

Zone of accumulation **نطاق التراكم**

جزء المثلجة الذى يتميز بتراكم الثلج وتكون الجليد، ويسمى الحد الخارجى لهذا النطاق بخط المثلجة snow line .

Zone of aeration **نطاق التهوية**

انظر "النطاق غير المشبع "unsaturated zone" .

Zone of saturation **نطاق التشبع**

النطاق الذى تمتلىء فيه تماما كل المسام المفتوحة فى الراسب أوالصخر بالماء الأرضى (الجوفى) .

Zoned crystal **بلورة متمنطقة**

بلورة مفردة من معدن واحد ، يختلف تركيبها الكيميائى فى جزئها الداخلى عنه فى جزئها الخارجى ، تكونت فى معادن يمكن أن يكون فيها اختلاف فى نسبة بعض العناصر ، وتنتج عن تغير تركيز العناصر فى الصهارة أثناء تبردها .

Weathering **تجوية**

مجموعة العوامل التى تؤدى إلى تفتت الصخور وتحللها ، بسبب مزيج من التكسر الفيزيائى والتحلل الكيميائى .

Weathered rind **لحاء تجوية**

نطاق تغير لونه فى الصخر المجوى يحيط بلب غير مجوى .

Welded tuff **طف ملتحم**

صخور فتات نارى ، كان فتاتها الزجاجى لدنا وساخنا جدا ، وعندما ترسبت انصهرت تحت تأثير الحرارة الكامنة فى الفتات وثقل المواد المتساقطة لتكون صخر زجاجى ، ويسمى أيضا اجنمبريت ignimbrite .

Well **بئر**

تجويف فى الأرض ، مجهز لاستخراج سائل من باطن الأرض ، وخصوصا الماء والبترول .

X

Xenoliths **صخور دخيلة**

فتات من صخر المنطقة country rock تكون محاطة بالكامل بالصخر النارى .

Y

Yardang **ياردانج (حيد ريحى)**

مجموعة من التلال أو الحيود المستطيلة والمتوازية لها قمم حادة ، تمتد فى اتجاه الريح السائدة فى المناطق القاحلة ، ويبدو أن

Volcanic breccia بريشيا بركانية

صخر فتات نارى يكون فيه قطر الفتات أكبر من 64 مـم تكـون نتيجة نشاط بركانى انفجارى .

Volcanic dome قبة بركانية

تجمع مستدير حول مخرج vent ، يتكون من لابة متجمدة شديدة اللزوجة لتنساب بعيدا بسرعة ، وتكون عادة لابة ريوليتية .

Volcanic island arc قوس جزر بركانى

انظر قوس بركانى volcanic arc.

Volcanic neck نصلة بركانية

قناة أسطوانية تقريبـا مـن صـخر نـارى بركـانى ، تكـون أنبوبـة التغذية لمخرج بركانى vent انفصلت عن الصخر المحيط نتيجـة للتجوية .

Volcanic tuff طف بركانى

صخر متصلد يتكون من فتـات نـارى صـخرى ورمـاد بركـانى ناعم ، لحمت ببعضها بحرارتها الخاصة .

Volcanism تبركن

العمليات التـى تـؤدى لتكـوين بـراكين ، حيـث يـؤدى انـدفاع الصهارة والغازات المصاحبة فى الغلاف الجـوى أو فـوق سـطح الأرض إلى تكـوين لابـة تتـصلد لتكـون صـخورا بركانيـة وتضاريس مميزة .

Volcano بركان

تل أو جبل مخروطـى الـشكل عـادة ، تكـون حـول عنـق vent مركزى اندفعت منـه اللابـة والمـواد الفتاتيـة البركانيـة (التفـرا) والغازات إلى سطح الأرض .

W

Water divide مقسم المياه

انظر مقسم المياه divide .

Water table منسوب الماء الجوفى

السطح العلوى للنطاق المشبع بالماء الجوفى.

Waterfall مسقط مياه (شلال)

منطقة فى مجرى النهر يكون التيار فيهـا أسرع مـن غيرهـا نتيجـة زيادة مفاجئة فى انحدار المجرى ، حيث تساوى سرعة تحرك المياه حينئذ سرعة السقوط الحر .

U-shaped valley وادى يشبه حرف يو

وادٍ عميق له جوانب حادة تنتهى بأرض مستوية ، وهـو الـشكل الذى ينتج عن تجوية المثالج .

V

Valley (stream) وادى

المنطقة المحصورة بين قمم المنحـدرات عـلى كـلا جـانبى مجـرى النهر .

Valley glacier مثلجة الوادى

مثلجة أصغر حجما من المثلجة القارية ، أو غطاء جليدى ينساب على امتداد أودية كبيرة فى المناطق الجبلية .

Varve صلصال رقائقى حولى

زوج من الطبقات الرقيقة ، يدق حجم الحبيبات فيها مـن أسـفل لأعلى ، كما يتغير لونها مـن غـامق اللـون إلى فاتحـه ، وتوجـد فى البحيرات الجليديـة ، وتمثـل ترسـيب لفـترة زمنيـة قـدرها عـام واحد.

Vein عرق

ترسيب معدنى فى شق صخرى .

Ventifacts وجهريحيات

حصى وزلط يحتفظ بتأثيرات برى الرمـال عـلى سـطحه، والتـى تصبح مستوية وناعمة ولها حواف حادة بينها .

Vesicle فجوة (ج. فجوات)

فتحة صغيرة فى صخر نارى بركانى ، تكونت نتيجة لهروب غـاز كان ذائبا أصلا فى الصهارة تحت ضـغط مرتفـع ، عنـدما كانـت الصهارة الأم تحت سطح الأرض.

Viscosity لزوجة

مقياس مقاومة السائل للانسياب .

Volcanic arc قوس بركانى

سلسلة مقوسة من الجبال تمتد على حافة قارية تكونت جزئيا مـن النشاط النارى المصاحب لاندساس غلاف صخرى محيطى تحت قارة ، مثل جبال الأنديز والكاسكيد .

Volcanic ash رماد بركانى

راسب بركانى يتكـون مـن فتـات صـخرى ، يكـون عـادة مـن الزجاج، يقل قطره عن 2 مم ، ويتكون عندما تدفع قوة الغازات الهاربة رذاذا ناعما من الصهارة ، انظر رماد ash .

Tuff طف

فتات نارى صخرى يتكون من رماد بركانى أو تفرا فى حجم اللوبيات lapilli .

Turbidite عكاريات (رواسب العكر)

طبقة متدرجة الحبيبات من راسب ترسبت بتيارات تعكيرية .

Turbidity current تيار العكر

تيار تحركه الجاذبية الأرضية ، يتكون من خليط مخفف من راسب وماء كثافته أكبر من كثافة الماء المحيط به .

Turbulent flow انسياب مضطرب

نظام انسياب تتحرك فيه حبيبات المائع فى دوامات وأعاصير .

U

Ultramafic rock صخر فوقمافى

صخر نارى يتكون أساسا من معادن مافية ، ويحتوى على أقل من 10 ٪ فلسبار . وتشمل الصخور فوقمافية البريدوتيت والدونيت والبيروكسينيت .

Unconfined aquifer مكمن ماء غير محصور

خزان لا يتغطى بطبقة حابسة ، مما يؤدى إلى أن يكون مستوى الماء فى البئر الذى يخترق الخزان فى مستوى الماء الجوفى فى المنطقة المحيطة .

Unconformity عدم التوافق

سطح يفصل بين طبقتين ، ويمثل فترة توقف فى عملية الترسيب ثم التجوية التى تؤدى إلى إزالة بعض الرواسب والصخور ، ثم يعود الترسيب مرة ثانية .

Uniformitarianism, principle of

قاعدة الوتيرة الواحدة

المبدأ الذى ينص على أن العمليات التى شكلت الأرض خلال الزمن الجيولوجى هى العوامل نفسها التى تعمل الآن.

Uniform stress إجهاد منتظم

إجهاد متساوٍ فى كل الاتجاهات .

Unsaturated zone نطاق غير مشبع

منطقة تقع بين سطح الأرض ومنسوب الماء الجوفى groundwater table تكون مسام الصخور بها غير ممتلئة بالماء، ويسمى أيضا بنطاق التهوية zone of aeration .

Time stratigraphic unit وحدة طبقية زمنية

كل الصخور والرواسب التى تكونت خلال فترة محددة من تاريخ الأرض .

Topography طوبوغرافية

تضاريس وشكل الأرض .

Topset layer طبقة القمة

طبقة راسب نهرى تغطى الطبقات أمامية الموضع فى الدلتا.

Trace element عنصر شحيح

عنصر يظهر فى معدن بتركيز أقل من 0.1٪ (وغالبا أقل من واحد فى الألف) .

Trace fossil حفريات الأثر

شاهد غير مباشر على الحياة القديمة ، مثل موضع القدم وحفر الديدان وجر الذيل وغيرها ، وقد حفظت على أسطح الطبقات بصورة طبيعية .

Transform boundary حد ناقل

نقطة التقاء ظاهرتين تشوهيتين رئيسيتين ، مثل حيد وسط المحيط أو خندق قاع محيطى أو صدع مضربى الزلة .

Transform fault صدع ناقل

نوع من الصدوع المضربية الزلة يربط بين ظاهرتين تركيبيتين رئيسيتين .

Transverse dune كثيب مستعرض

كثيب رملى مكون من حيد طويل وضيق يشبه الموجة، محوره عمودى على اتجاه الريح السائدة أو اتجاه التيار.

Trap مصيدة بترولية

صخر خزان له صخر سقف يساعد على تجمع البترول.

Trench خندق

أحواض مقوسة طويلة ،ضيقة وعميقة جدا فى قاع البحر.

Tributary رافد

رافد يربط رافدا أكبر .

Triple junction ملتقى ثلاثى

التقاء بين ثلاثة مراكز انتشار حديثة ، حيث تكون الزاوية بين ذراعين تساوى 120° .

Tsunami تسونامى

انظر موجة بحرية زلزالية seismic sea wave .

جيولوجيا بنائية (بنائيات) **Tectonics**

دراسة حركة وتشوه الغلاف الصخرى ، كما تهتم بدراسة المعالم التركيبية الكبرى للجزء الخارجى من الأرض وأسباب تكونها .

مثلجة معتدلة الحرارة **Temperate (warm) glacier**

مثلجة يكون فيها الجليد عند نقطة الانصهار الضغطى pressure melting point ، ويتواجد فيها الماء والجليد معا فى حالة اتزان .

إجهاد شد **Tensional stress**

إجهاد تفاضلى على الجسم يسبب مطه واستطالته .

تفرا **Tephra**

فتات نارى مفكك . مرادف فتات نارى pyroclasts.

شرفة (ج. شرفات) **Terrace**

مصاطب طمية مستوية أعلى السهل الفيضى floodplain ممتدة على جانبى النهر ، وتوجد الشرفات عادة فى عدة أزواج ويكون مجرى النهر محصورا بين الزوج السفلى منها .

إقليم طوبوغرافى **Terrane**

منطقة واسعة من القشرة الأرضية ، لها سمات جيولوجية مميزة .

بحر التيثيز **Tethys**

بحر ضيق يفصل الجندوانا عن اللوريسيا .

نسيج **Texture**

الصفات العامة للصخر مثل حجم وشكل وترتيب الحبيبات المعدنية المكونة له .

تحول حرارى **Thermal metamorphism**

انظر تحول تماسى contact metamorphism .

صدع دسر **Thrust fault**

صدع معكوس reverse fault ، يميل مستواه بزاوية صغيرة تقل عن 45° غالبا على معظم امتداده .

المد والجزر **Tide**

ارتفاع ثم انخفاض مستوى سطح البحر خلال اليوم ، ينشأ بسبب قوة جذب القمر والشمس .

حريث **Till**

راسب غير مفروز ترسب مباشرة من جليد المثلجة .

صخر الحريث **Tillite**

صخر رسوبى غير مفروز مثلجى النشأة ، وهو حريث متصخر .

هبوط **Subsidence**

حركة تجبل رأسية ، حيث تغوص منطقة واسعة من القشرة الأرضية دون تشوه ملحوظ .

مجرى لاحق **Subsequent stream**

رافد نحت مجراه فى الصخور الرخوة أو فى غيرها من التراكيب الجيولوجية ، نظرا لأنه أصبح منضبطا أو منظما .

مجرى مائى متراكب **Superposed stream**

مجرى مائى نحت مجراه عبر مجموعة من الصخور حتى وصل إلى مجموعة أخرى تحتها تختلف فى خواصها الصخرية والتركيبية ، وقد تحدد نمط الصرف الأصلى للمجرى المائى عند نحته للمجموعة العلوية ، وليس تبعا للمجموعة التى ينساب خلالها الآن .

حمولة معلقة **Suspended load**

المواد الدقيقة العالقة فى ماء مجرى مائى .

درز (التحام) **Suture**

نطاق تتشوه فيه الصخور بشدة ، يميز مناطق تصادم قارتين .

موجة إس **S waves**

موجات زلزالية جسمية تنبعث كسلسلة من الحركات المتبادلة الجانبية فى الجسم الصلب ، وتسبب تغيرا فى الشكل لكن لا تنتقل فى السوائل أو الغازات ، وهى موجات قص أو مستعرضة shear waves تسبب اهتزازا لجزيئات المواد الصلبة التى تمر خلالها فى اتجاه عمودى على اتجاه انتشارها .

طية متماثلة **Symmetrical fold**

طية يميل جناحاها بميل متساو على جانبى محورها .

طية مقعرة **Syncline**

طية مقعرة تأخذ شكل حوض .

نظام **System**

الوحدة الأساسية فى تصنيف التتابع الطبقى إلى وحدات زمنية - طبقية .

T

ركام **Talus**

تراكم من حطام صخرى يتجمع أسفل سفح مرتفع .

قار (أسفلت) **Tar (asphalt)**

زيت لزج وسميك جدا بحيث لا يمكنه الانسياب.

Stratosphere **الاستراتوسفير**

الجزء العلوى من الغلاف الجوى ، بين 10 و50 كم فوق سطح الأرض ، حيث تتكون طبقة الأوزون .

Stratovolcanoe **بركان طباقى**

بركان مخروطى حاد الجوانب يحتوى على طبقات من التفرا (الفتات النارى) ولابة لزجة . مرادف لبركان مركب composite volcano .

Streak **مخدش**

لون مسحوق المعدن ، ويحصل عليه بحك المعدن بسطح خشن صلب .

Stream **مجرى مائى**

جسم مائى يحمل حبيبات فتاتية ومواد ذائبة تنساب إلى أسفل المنحدر فى مجرى محدد .

Stress **إجهاد**

قيمة واتجاه قوة التشويه.

Striation, glacial **حز جليدى**

انظر تحزز جليدى glacial striation .

Strike **مضرب**

الاتجاه الذى يأخذه تركيب ما مثل طية أو صدع عند تقاطعه مع المستوى الأفقى .

Strike-slip fault **صدع مضربى الانزلاق**

صدع تكون فيه الإزاحة أفقية وموازية لخط سطح الصدع.

Stromatolite **استروماتوليت**

نظام بيولوجى معقد ، فى شكل رواب وأعمدة من سيانوبكتريا هوائية ولاهوائية وطحالب ورواسب ناعمة.

Structural geology **جيولوجيا تركيبية**

فرع الجيولوجيا الذى يدرس التشوه فى الصخور .

Subduction **عملية الاندساس**

العملية التى يغوص فيها غلاف صخرى قديم بارد فى الغلاف اللدن (الاستينوسفير) تحت لوح علوى راكب ، وتحدث عملية الاندساس عند حدود الألواح المتقاربة.

Subduction zone **نطاق الاندساس**

نطاق طولى ضيق بين لوح محيطى ولوح علوى راكب ، وهو يتميز بنشاط زلزالى عال .

Stalactite **هابط (ج. هوابط)**

راسب يتكون من معادن الكالسيت أو الأراجونيت يشبه جبل الجليد iciclelike أو الأسنان ، يتدلى من سقف كهف ، ويتكون من تبخر وترسيب المحاليل فى فجوات وشقوق الحجر الجيرى .

Stalagmite **صاعد (ج. صواعد)**

راسب يشبه جبل الجليد ، يرتفع صاعدا من أرضية كهف أسفل الهوابط ، ويتكون بطريقة تكون الهوابط نفسها stalactites.

Star dune **كثيب نجمى**

كثيب رملى على هيئة تل منعزل ضخم من الرمل تشبه قاعدته النجمة .

Stock **كتلة شاخصة (ستوك)**

جسم صغير غير منتظم من صخر نارى متداخل ، أصغر من الباثوليث ، يقطع أسطح طباقية الصخور المتداخل فيها.

Strain **انفعال**

مقياس التغير فى طول وحجم وشكل المواد نتيجة تعرضها للإجهاد stress . مرادف تشوه deformation .

Strata (singular stratum) **طبقات (مفرد. طبقة)**

طبقة مميزة من الرواسب تتجمع على سطح الأرض .

Stratabound mineral deposits
رواسب معدنية مقيدة الطباقية

خامات الرصاص والزنك والنحاس وغيرها من الفلزات المحتواة فى الصخور الرسوبية بطريقة تشبه تماما الرواسب الابتدائية ، أى التى تكونت فى وقت الترسيب نفسه .

Stratification **تطبق**

الترتيب الطباقى للرواسب والصخور الرسوبية والصخور النارية السطحية .

Stratigraphic superposition, principle of
قاعدة تعاقب الطبقات

فى أى تتابع طبقى ، لم يقلب لاحقا ، يكون ترتيب الترسيب من أسفل إلى أعلى .

Stratigraphy **علم الطبقات**

علم وصف ومضاهاة وتصنيف الطبقات ، خاصة فى الصخور الرسوبية ، ويشمل وصف وتفسير بيئات ترسيب تلك الطبقات.

Snowline خط الثلج

خط الارتفاع الذى لاينصهر ما يسقط فوقه من ثلج فى فصل الصيف .

Soil تربة

تجمع من الرمال والصلصال والدوبال على سطح الأرض ، وهى جزء من الحطام الصخرى (الأديم) الذى يدعم نمو النباتات الجذرية .

Soil horizons نطاقات التربة

نطاقات أفقية لها خصائص مميزة ، تكونت نتيجة للتجوية الكيميائية والعمليات الأخرى التى تؤدى إلى تكون التربة .

Soil profile قطاع التربة

قطاع رأسى فى التربة يظهر النطاقات المكونة لها .

Solifluction دفق التربة

حركة زحف بطيئة جدا للتربة والحطام السطحى المشبع بالماء و/ أو الثلج ، وتحدث بسبب تجمد وذوبان الثلج بشكل ترددى ، ويشيع فى المناطق القطبية .

Solubility قابلية الذوبان (لمعدن)

قدرة المعدن على الذوبان فى الماء ، وتساوى كمية المعدن الذى يذوب فى الماء حتى يصل المحلول إلى نقطة التشبع .

Sorting الفرز

مقياس لمدى تقارب حجم حبيبات راسب أو صخر رسوبى .

Source rock صخر مصدرى

صخر رسوبى يحتوى على مادة عضوية هى مصدر البترول.

Specific gravity كثافة نوعية

رقم يعبر عن نسبة وزن المادة إلى وزن حجم مماثل من الماء النقى، كما تساوى النسبة بين كثافة المادة المعطاة وكثافة الماء عند 4°م.

Spheroidal weathering تجوية كروية

خلع متوالٍ لراقات كروية من الصخر المتحلل السطح الخارجى لكتلة صخرية صلبة مستديرة نتيجة للتجوية الكيميائية أو الفيزيائية ويتبقى لب داخلى كروى .

Spreading center مركز الانتشار

حافة لوح نامية جديدة ، تنطبق على حيد وسط محيطى.

Spring ينبوع

انسياب الماء الجوفى طبيعيا إلى سطح الأرض.

Shield درع

منطقة واسعة تتكون من صخور قاعدة basement ثابتة قديمة داخل قارة .

Shield volcano بركان درعى

بركان يقذف لابة بازلتية غير لزجة ، ويبنى مخروطا متسعا ضخما يشبه القبة تنحدر جوانبه بلطف شديد .

Silicate mineral معدن سيليكاتى

معدن يحتوى على أيون سيليكات $(SiO_4)^{4-}$.

Silicon-oxygen tetrahedron

رباعى الأوجه للسيليكون والأكسجين

تركيب يتكون من أربع ذرات من الأكسجين تحيط بذرة من السيليكون وتكون اللوحدة البنائية الأساسية لمعادن السيليكات.

Sill جدة موازية

فريش أفقى متوازى الجوانب ، من صخر نارى متداخل ، يوازى أسطح طبقات الصخور المتداخل فيها.

Siltstone حجر الغرين

صخر رسوبى يتكون أساسا من فتات معدنى فى حجم الغرين .

Sinkhole حفرة بالوعية

منخفض دائرى عميق مفتوح إلى السماء ، يوجد فوق صخور كربوناتية بها الكثير من الكهوف .

Slate إردواز

صخر متحول منخفض الرتبة ، به انفصام إردوازى واضح.

Slickensides خدوش الصدع (مصقل سحجى)

أسطح بها حزوز أو مصقولة جيدا على أسطح الصخور الصلدة، بريت نتيجة الحركة على سطح صدع .

Slip face وجه انزلاق

المنحدر المستقيم المدابر للريح lee slope فى الكثيب الرملى .

Slump تدهور

نوع من التحرك الكتلى تكون فيه الحركة الدورانية للصخر أو الحطام الصخرى (الأديم) على سطح منحدر مقعر .

Slurry flow انسياب الطين المائع

كتلة متحركة من راسب مشبع بماء محتبس بين الحبيبات وينتقل بسبب تحرك الكتلة .

طريقة الفجوة الزلزالية **Seismic gap method**

وهى طريقة لتوقع موقع زلزال فى المناطق ذات الاحتمالات العالية لحدوث زلزال فى نطاق صدع نشط ، اعتمادا على دراسة أجزاء الصدع التى لم يحدث فيها زلزال رئيسى لفترة زمنية سابقة.

موجات بحرية زلزالية **Seismic sea waves**

موجات ذات طول موجى كبير فى المحيط ، تنتج عن الحركة السريعة والمفاجئة لقاع المحيط نتيجة لزلزال قوى ، وقد تنشأ أيضا من الانزلاقات الأرضية أو النشاطات البركانية تحت سطح البحر . وقد تسبب تلك الموجات تدميرًا شديدًا فى المناطق الشاطئية . مرادف تسونامى tsunami .

موجات سطحية زلزالية **Seismic surface wave**

موجة زلزالية تتبع سطح الأرض فقط ، بسرعة أقل من الموجات S .

موجات زلزالية **Seismic waves**

اضطرابات مرنة تنتشر بعيدًا عن بؤرة زلزال .

سيزموجراف (مسجل الزلازل) **Seismograph**

آلة تستخدم فى دراسة الهزات والذبذبات التى يسببها الزلزال .

علم الزلزال **Seismology**

دراسة الزلازل والموجات الزلزالية .

سربنتينيت **Serpentinite**

صخر يتكون أساسا من معدن السربنتين .

نطاق الظل **Shadow zone**

نطاق بين 105° و 142° من مركز الزلزال epicenter لايحدث فيه أى تخلل للموجات الزلزالية عبر القشرة بسبب الانكسار الموجى .

طفل **Shale**

صخر رسوبى فتاتى دقيق التحبب ، يميل للانفصال إلى رقائق على امتداد مستويات التطبق .

إجهاد القص **Shear stress**

قوة تؤثر على الجسم تسبب تشققه أو انتقاله ، ويسود فى الصدوع الناقلة transform faults عند حدود الألواح الناقلة .

قواطع صفائحية **Sheeted dykes**

مجموعة كبيرة من القواطع الرأسية شبه متوازية .

راسب **Sediment**

حبيبات غير متماسكة ترسبت على سطح الأرض بعوامل فيزيائية (مثل الرياح والماء والثلج) ، أو كيميائية (بالترسيب من المحيطات والبحيرات والأنهار) أو بيولوجية (مثل الكائنات الحية) .

انسيابات الراسب **Sediment flows**

انهيال كتلى لمخاليط من الرواسب والماء والهواء .

حوض ترسيب **Sedimentary basin**

منطقة واسعة (10000 كم^2 على الأقل) تمثل موضع تجمع سمك كبير من الرواسب .

بريشيا رسوبية **Sedimentary breccia**

صخر فتاتى يتكون أساسا من فتات زاوِ حبيباته كبيرة الحجم .

بيئة رسوبية **Sedimentary environment**

منطقة محدودة جغرافيا تحفظ فيها الرواسب ، ويميزها شكل تضاريسى ومناخ محددان ، وأيضا طاقة نسبية للماء وتيارات رياح ونشاط عضوى وانتشار نسبى لمختلف المواد الكيميائية .

سحنة رسوبية **Sedimentary facies**

مجموعة الخصائص الصخرية والحيوية المميزة لأى وحدة رسوبية ، والتى تميزها عن غيرها من المجموعات السحنية المزامنة لها وتوجد فى الوحدة نفسها.

صخر رسوبى **Sedimentary rock**

صخر تكون بالترسيب الكيميائى أو بترسيب ولحام حبيبات معدنية نقلت إلى موضع الترسيب بالماء أو بالرياح أو بالجاذبية .

تركيب رسوبى **Sedimentary structure**

تركيب فى صخور رسوبية أو متحولة قليلا ، تكون وقت الترسيب ، ويشمل التطبق bedding والتطبق المتقاطع cross-bedding والتطبق المتدرج graded bedding وتشققات الطين mud cracks وغيرها .

زلزالية **Seismicity**

التوزيع العالمى أو المحلى للزلازل فى الزمان والمكان، وهو مصطلح عام يطلق على عدد الزلازل فى وحدة الزمن .

أحزمة زلزالية **Seismic belts**

مناطق واسعة من سطح الأرض تعرضت لهزات أرضية متلاحقة .

Sand ripples **نيم الرمال (مويجات رمال)**

سلسلة من الأعراف (الحيود الطولية) الصغيرة المتظمة نسبيا على سطح جسم من الرمل مثل الكثيب، وتكون قمم هذه المويجات عمودية على اتجاه الريح .

Sandstone **حجر رملى**

صخر رسوبى فتاتى حبيباته متوسطة الحجم فى حجم الرمل (يتراوح قطرها بين 0.0625 و2 مم) ، وتتكون عادة من كوارتز وفلسبار وفتات صخرى لحمت معا بمادة لاحمة من الكوارتز والكربونات وغيرها من المعادن وأرضية من معادن الطين .

Saturated zone **نطاق التشبع**

نطاق الماء الجوفى ، الذى تكون فيه كل الحبيبات ممتلئة بالماء .

Scale (of a map) **مقياس رسم**

النسبة من وحدة مسافة على الخريطة والوحدة التى تمثلها على سطح الأرض .

Schist **شست**

صخر متحول متورق ، وترى فيه نسبة المعادن الصفائحية بشكل واضح .

Schistosity **شستوزية**

الترتيب المتوازى للمعادن الخشنة الحبيبات التى لها تركيب صفائحى مثل الميكا والكلوريت ، والتى تكونت أثناء عملية التحول تحت ظروف إجهاد تفاضلى .

Sea-floor spreading, theory of
نظرية انتشار قيعان المحيطات

نظرية وضعت فى بداية الستينات تنص على أن قشرة محيطية جديدة تتكون من الصهارة الصاعدة عند حيود وسط المحيط عندما تتحرك الألواح جانبيا بعيدا عن الحيود .

Seamount **جبل بحرى**

جبل بركانى منعزل ، يرتفع أكثر من 1000 متر فوق قاع البحر ومغمور كلية تحت الماء .

Secondary enrichment **إثراء ثانوى**

عملية تجوية كيميائية لراسب معدنى كبريتيدى ، تؤدى إلى زيادة محتواه من الفلز .

Secondary waves **موجات ثانوية**

انظر الموجات S .

Rockfall **سقوط صخرى**

السقوط الحر لمادة صخر أساس منفصلة من جرف أو منحدر شديد .

Rock flour **دقيق صخرى**

حبيبات صخرية دقيقة تنتج عند تكسير وطحن الصخور عند قاعدة المثلجة.

Rock glacier **مثلجة صخرية**

فص من فتات صخرى ملتحم بالثلج ، يتحرك ببطء أسفل المنحدر بطريقة تشبه المثلجة .

Rockslide **انزلاق صخرى**

حركة سريعة مفاجئة لكتل متكسرة من صخر الأساس أسفل المنحدر عبر سطح منحدر .

Rock-stratigraphic unit **وحدة صخرية طباقية**

وحدة صخرية مميزة ، يمكن تعرفها بناء على خواصها الفيزيائية والتركيبية .

Runoff **صرف سطحى**

جزء من المطر الساقط ينساب على سطح الأرض .

S

Sabkha **سبخة**

مسطح ملحى جاف فوق نطاق المد ، يوجد عادة على امتداد حواف البحار الضحلة الاستوائية مثل الخليج العربى.

Salinity **ملوحة**

مقياس ملوحة البحر ، ويعبر عنها عادة بعدد من الأجزاء فى كل ألف جزء من الماء .

Saltation **وثب**

حركة حبيبة راسب إلى الأمام فى سلسلة من القفزات القصيرة المتقطعة فى مسارات قوسية .

Sandblasting **سفع الرمال**

عملية تجوية فيزيائية ، يتجوى فيها الصخر بسبب قذفه وتصادمه بحبيبات الرمل التى يحملها الريح ، ويؤدى عادة إلى تكوين وجهريجات ventifacts من الحصى والزلط .

Sand sea **بحر رمال**

منطقة واسعة مغطاة بالرمل المتحرك ، ويوجد بها تجمع هائل من الكثبان الرملية ، وتهب عليها الرياح بقوة . مرادف إرج erg .

صهارة ريوليتية **Rhyolite magma**

أحد أنواع الصهارة الثلاثة الشائعة ، وتتكون من 70 ٪ من وزنها ثانى أكسيد سيليكون SiO_2 .

مقياس ريختر لقدر الزلزال **Richter magnitude scale**

مقياس مبنى على السعات المسجلة للموجات الزلزالية الجسمية، لمقارنة كميات الطاقة الناتجة عن الزلازل .

خسيف **Rift**

انظر خسيف graben .

وادى خسف **Rift valley**

حوض صدع تكون عند حد لوح متباعد أو منطقة شد أخرى .

صدع يمينى الانزلاق **Right-lateral fault**

انظر صدع يسارى الانزلاق left-lateral fault .

نيم **Ripple**

كثيب صغير جدا من الرمل أو الغرين silt ، يكون بعده الطويل عموديًا على التيار .

علامات نيم **Ripple mark**

مجموعة من الأعراف (التلال الصغيرة) المنتظمة شبه المتوازية ، المحفوظة فى الصخر ، وتمثل تموجًا سابقًا على سطح الصخور الرسوبية.

نهر **River**

مصطلح عام يطلق على مجرى مائى كبير نسبيا ، أو الفروع الرئيسية لنظام نهرى .

صخر **Rock**

كتلة من مادة معدنية متماسكة ، صلبة غير حية، تكونت طبيعيا ، ويكون جزءا من كوكب .

هيار صخرى **Rock avalanche**

حركة سريعة لكتلة من مادة صخرية على منحدر ، مما يؤدى إلى مزيد من التكسر للمادة .

دورة صخور **Rock cycle**

مجموعة العمليات الجيولوجية التى يتكون بها أى من الأنواع الثلاثة للصخور من النوعين الآخرين: فتتحول الصخور الرسوبية sedimentary rocks لتكون الصخور المتحولة metamorphic rocks ، أو تنصهر لتكون الصخور النارية igneous rocks . وكل الصخور قد ترفع وتتعرض للتجوية فتكون رواسب sediments ، تتصخر لتكون صخورا رسوبية.

المغناطيسية المتبقية **Remanent magnetism**

كمية من مغناطيسية الصخور نشأت عن المجال المغناطيسى للأرض عندما تكونت تلك الصخور . ويفيد قياس اتجاهها فى تحديد المواضع القديمة للعينة بالنسبة لخطوط الطول والعرض وقت تكون صخور تلك العينة، وبالتالى الكتلة القارية .

إحلال **Replacement**

عملية يذيب خلالها محلول مادة ما موجودة فعلا ، وفى الوقت نفسه يرسب من المحلول حجم مساو من مادة أخرى .

احتياطيات **Reserves**

رواسب من المعادن أو الفحم أو الزيت أو الغاز القابلة للاستخراج بالوسائل التكنولوجية المتاحة . ويطلق مصطلح "المخزونات المؤكدة" "proven reserves" على المخزونات التى أثبت الدراسات أنها تتواجد بنوعية جيدة وكميات جيدة أيضا . انظر أيضا resources .

خزان **Reservoir**

مصدر أو مكان وجود المعادن فى الدورة الكيميائية أو الدورة المائية .

صخر خزان **Reservoir rock**

جسم مسامى من الصخور يتجمع فيه البترول .

راسب معدنى متبق **Residual mineral deposit**

أى تركيز معدنى محلى يتكون نتيجة للتجوية .

موارد **Resources**

رواسب معدنية أو فحم أو زيت أو غاز اكتشفت أو لم تكتشف ومتاحة للاستخدام حاليا ، أو قد تكون متاحة للاستخدام فى المستقبل ، وتشمل الاحتياطات بالإضافة للرواسب المكتشفة ولكن لم تستخرج لأسباب فنية أو اقتصادية ، كما تشمل أيضا الرواسب التى لم تكتشف بعد، ولكن قد يستدل على وجودها .

تحول تراجعى **Retrograde metamorphism**

تغيرات تحولية تحدث عندما تنخفض درجات الحرارة والضغط.

صدع معكوس **Reverse fault**

صدع تحرك فيه الحائط العلوى نسبيا لأعلى بالنسبة للحائط السفلى .

ريوليت **Rhyolite**

صخر نارى بركانى دقيق التحبب له تركيب الجرانيت.

Recumbent fold طية مضطجعة

طية يكون مستواها المحورى أفقيا .

Rectangular drainage صرف متعامد

نظام قنوات تأخذ فيه كل قطعة مستقيمة لكل قناة أحد اتجاهين عموديين مميزين ، وتتبع عادة مجموعة من الفواصل.

Recurrence interval فترة تكرار

متوسط الفترة الزمنية اللازمة لتكرار حدث جيولوجى مثل فيضان أو بركان ، ويكون له سعة معلومة .

Reducing environment بيئة اختزالية

بيئة ينعدم فيها الأكسيجين ولا تتحلل المادة العضوية ، ولكن تتحول ببطء إلى كربون صلب .

Reef شعب (ج. شعاب)

تركيب يشبه العرف أو الحيد يتكون أساسا من البقايا الجيرية للكائنات البحرية القاعية مثل المراجين والطحالب. والبيئة المثلى لنمو الشعاب تكون فى المياه الضحلة الدافئة المضيئة الغنية بالأكسيجين ومجاورة للشاطئ ، وتنفصل الشعاب الحاجزة barrier reefs عن الشاطىء برف ضحل ، بينما يكون الأتول atoll عبارة عن حلقة من الشعاب يتوسطها لاجون مركزى . وتنمو معظم الشعاب الآن فى البحار الضحلة بين خطى عرض 30° شمالا وجنوبا .

Reflection انعكاس

ارتداد موجة عبر السطح الفاصل بين وسطين .

Refraction انكسار

تغير فى السرعة يحدث عندما تنتقل موجة من وسط لآخر.

Regional metamorphism تحول إقليمى

تحول يؤثر على مناطق واسعة من القشرة الأرضية ، ويؤدى إلى تغيرات ميكانيكية وكيميائية .

Regolith حطام صخرى (أديم)

فريشة من حبيبات صخرية مفككة غير ملتحمة، تغطى سطح الأرض .

Relative age عمر نسبى

عمر حدث جيولوجى أو ظاهرة جيولوجية منسوبا لحدث جيولوجى أو ظاهرة جيولوجية أخرى ، ومعبرًا عنه بوحدات مقياس الزمن الجيولوجى النسبى .

R

Radiation إشعاع

انبعاث طاقة حرارية أثناء مرور الموجات الكهرومغناطيسية .

Radioactivity الإشعاع الذرى

تغير لحظى لنواة ذرة غير مستقرة إلى ذرة مستقرة ، حيث تتغير نواة نظير غير مستقر بإطلاق جسيمات أو إشعاع إلى نظير مستقر.

Radiometric age عمر إشعاعى

الفترة الزمنية التى يحتوى فيها معدن ساعة إشعاعية داخله.

Radiometric dating تأريخ بالطرق الإشعاعية

تقدير أعمار المواد الجيولوجية بقياس نسبة النظير المشع إلى نظيره غير المشع فيها .

Radioactive decay اضمحلال إشعاعى

تغير نواة ذرة غير ثابتة إلى نواة أكثر ثباتا .

Rainshadow ظل المطر

منطقة قاحلة توجد على الجانب المدابر لاتجاه الريح من السلسلة الجبلية ، حيث تكون كمية المطر الساقطة عليها أقل بشكل ملحوظ منها على الجانب المقابل للريح.

Rank رتبة (فحم)

رتبة التحول التى وصل إليها ، وهى الأساس الذى يقسم الفحم طبقا له إلى سلسلة تبدأ من اللجنيت إلى الأنثراسيت .

Rapids جنادل

منطقة فى مجرى النهر يكون التيار فيها أسرع من غيرها ، كما يكون السطح متكسرا لكن انحداره غير كاف لإحداث شلال waterfall . وتتكون الجنادل عادة عندما يجرى الماء فوق عدد متتابع من السلالم الصغيرة ، أو عندما تحدث زيادة مفاجئة فى انحدار المجرى ، أو لوجود صخور شديدة المقاومة للتآكل فى مجرى النهر ، ولاتستعمل الكلمة بصيغة المفرد .

Recharge إعادة الملء

إضافة ماء إلى النطاق المشبع من نظام الماء الجوفى .

Recharge area منطقة إعادة الملء

منطقة يضاف فيها ماء إلى النطاق المشبع .

Recrystallization إعادة التبلور

تكوين معادن متبلورة جديدة داخل صخر .

Prograde metamorphic effects تأثيرات تحول متصاعد

التغيرات التحولية التى تحدث عندما ترتفع درجة الحرارة والضغط .

Prokaryote بروكاريوتا

كائنات بدائية وحيدة الخلية ، ليس لها نواة واضحة.

Proterozoic البروتيروزوى

الدهر eon الذى يلى الأركى ويسبق الفانيروزوى .

Proton بروتون

جسيم مشحون بشحنة موجبة تساوى 1.6×10^{-19} كولوم يعبر عنها ب (+1) ، وكتلته تعادل كتلة 1832 إلكترون ، ويوجد فى نواة الذرة .

Pumice بيوميس (حجر الخفاف)

نوع من الزجاج البركانى ، له تركيب فلسى عادة ، وممتلئ بالثقوب والفجوات بسبب هروب الغازات أثناء التبرد ، وهى تشبه الإسفنج وكثافتها منخفضة للغاية . انظر الأوبسيديان obsidian .

P waves موجات بى

موجات ابتدائية جسمية زلزالية ، وهى أسرع الموجات المنبعثة من مصدر زلزالى ، تنبعث كنبضات تضاغطية وانبساطية متبادلة، وتمر عبر المواد الصلبة والسائلة والغازية .

Pyroclasts فتات نارى

فتات صخرى اندفع أثناء ثورة بركان ، ويقسم عادة على أساس الحجم . مرادف تفرا tephra.

Pyroclastic flow فيض الفتات النارى

انسياب غازات وفتات نارى ساخن يتحرك فى هيئة سحابة متوهجة تندفع على المنحدرات بسرعة أثناء ثوران بركان .

Pyroclastic rocks صخور نارية فتاتية

صخور تكونت من الفتات النارى .

Q

Quartzite كوارتزيت

صخر متحول أبيض اللون ، غير متورق nonfoliated ، شديد الصلابة، تكون من الحجر الرملى ، غنى بحبيبات الكوارتز وتكون المادة اللاحمة فيه من الكوارتز أيضا ، ويتكسر الصخر عبر حبيبات الكوارتز وليس عبر المادة اللاحمة .

Polar (cold) glacier مثلجة قطبية

مثلجة يكون فيها الجليد تحت نقطة الانصهار الضغطى فى كل مكان ، ويكون الجليد متجمدا إلى قاعها .

Polymorph متعدد الشكل

مركب يوجد فى أكثر من بناء بلورى ، كما يطلق على معدنين أو أكثر لها التركيب الكيميائى نفسه ولكن فى بنية بلورية مختلفة ، مثل الكالسيت والأراجونيت .

Porosity مسامية

النسبة المئوية للحجم الكلى للمسام ، التى توجد فى جسم ما من صخر الأساس أو الحطام الصخرى (الأديم) .

Porphyroblast بورفيروبلاست

بلورة كبيرة وسط مادة لاحمة ناعمة ، فى صخر متحول .

Porphyritic texture نسيج بورفيرى

نسيج فى صخر نارى يتكون من حبيبات معدنية كبيرة تعرف بالبلورات الظاهرة phenocrystsفى أرضية groundmass مكونة من حبيبات صغيرة من المعادن.

Porphyry بورفيرى

صخر نارى يتكون من حبيبات معدنية خشنة موزعة فى أرضية من حبيبات معدنية دقيقة.

Porphyry copper deposit راسب نحاس بورفيرى

نوع من راسب معدنى حرارى يصاحب التداخلات النارية البورفيرية .

Pothole حفرة وعائية

فجوة نصف دائرية فى صخر أساس bedrock قاع مجرى مائى، تكونت بسبب كحت أو برى الحصى والزلط المتواجد فى تيار مائى شديد.

Precipitate ترسيب

البلورات التى تترسب من محلول مشبع .

Pressure melting point نقطة الانصهار الضغطى

درجة الحرارة التى يمكن أن ينصهر عندها الجليد ، عند ضغط معين .

Primary waves موجات أولية

انظر الموجات P .

Plateau هضبة

منطقة واسعة من الأرض المرتفعة عن المناطق المحيطة .

Plate rotation axis محور دوران اللوح

محور دوران أحد ألواح الغلاف الصخرى للأرض .

Plate rotation pole قطب دوران اللوح

النقطة التى يصل فيها محور دوران اللوح إلى سطح الأرض .

Plate tectonics نظرية تكتونية الألواح

النظرية التى تدرس تكون الألواح وحركتها والعلاقة بينها والتشوهات التى تعتريها ، وكذلك محاولة تفسير الزلازل ونشأة البراكين وبناء الجبال وشواهد المغناطيسية القديمة فى ضوء حركة الألواح فوق طبقة الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) .

Platform رصيف

منطقة مستوية غالبا من اليابس ، ثابتة تكتونيا ، ومغطاة برواسب.

Playa بلايا (بحيرة جافة)

قاع مستو لحوض مغلق جاف ، فى منطقة صحراوية قاحلة، غنى عادة بمعادن المتبخرات ، وقد تغطيه بحيرة مؤقتة ، ويعرف الحوض فى هذه الحالة ببحيرة البلايا playa lake.

Plume بلوم

تيار صاعد يحمل الحرارة أو المواد المنصهرة جزئيا أو هما معا من الأجزاء السفلى للوشاح إلى الأجزاء العليا ، وقد يعزى النشاط البركانى داخل اللوح بعيدا عن حوافه إلى هذه البلومات.

Plunge غطس (الطية)

الزاوية المحصورة بين محور طية والمستوى الأفقى .

Plunging fold طية غاطسة

طية محورها مائل على الأفقى .

Pluton بلوتون

جسم يتكون من صخر نارى متداخل تحت سطح الأرض ، بصرف النظر عن حجمه وشكله . كما يطلق المصطلح أحيانا على جسم نارى كبير تكون فى أعماق القشرة الأرضية ، ولا يقل حجمه عن كيلومتر مكعب .

Point bar (حاجز حرفى) جانبى

راسب منحنى الشكل ، يتكون من الرمل أو الجرول على امتداد الجانب الداخلى ، لثنية مجرى نهر منعطف meander .

Physical weathering تجوية طبيعية (فيزيائية)

مجموعة العمليات الفيزيائية التى تؤدى إلى تفتت مكاشف الطبقات إلى حبيبات صغيرة .

Pillow lava لابة وسائدية

لابة بازلتية تتكون تحت الماء ، عندما تتكسر عدة ألسنة صغيرة من اللابة على قاع البحر البارد ، وتتجمد فجأة إلى مكون صخرى يشبه كومة من أكياس الرمل ، يتراوح حجمها بين عدة سنتيمترات ومتر أو أكثر .

Placer ركيزة (مراقد)

راسب فتاتى معدنى ذو قيمة بتركيز عال بشكل غير عادى ، ترسب عادة ميكانيكيا بسبب كثافته الكبيرة .

Planet كوكب

جرم سماوى كبير يدور حول الشمس فى مدار بيضاوى ، وتشمل الكواكب الداخلية inner أو الأرضية terrestrial وهى عطارد Mercury والزهرة Venus والأرض Earth والمريخ Mars ، وتتميز بأنها أصغر حجما وكثيفة ومادتها صخرية ، أما الكواكب الخارجية أو الغازية ، وهى : المشترى Jupiter وزحل Saturn وأورانوس Uranus ونبتون Neptune وبلوتو Pluto ، فتتميز بأنها كبيرة الحجم وقليلة الكثافة ، وحافظت على معظم غازاتها الأصلية التى ورثتها من السديم الشمسى .

Planetesimals جسيمات كوكبية

أجسام تشبه الشهب ، يعتقد أنها تكثفت من السديم الشمسى ثم تجمعت مع الغازات والثلج لتكون كواكب ابتدائية خلال الفترة بين 4.6 و 5.0 بليون سنة مضت.

Planetology علم الكواكب

دراسة مقارنة بين الأرض والشمس وغيرهما من الكواكب.

Plankton عوالق ، بلانكتون

كائنات حية ميكروسكوبية تطفو على سطح الماء .

Plastic flow انسياب لدن

تشوه حجم أو شكل المادة دون تشققها .

Plate لوح

أحد وحدات الغلاف الصخرى ، البالغ عددها اثنى عشر أو أكثر ، تتحرك كوحدة مستقلة فوق الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) .

بترول **Petroleum**

مواد غازية أو سائلة أو نصف صلبة توجد طبيعيا وتتكون أساسا من مركبات كيميائية من الكربون والهيدروجين .

علم الصخور **Petrology**

فرع خاص من الجيولوجيا يهتم بدراسة تواجد وأصل وتاريخ الصخور .

دهر الحياة الظاهرة **Phanerozoic**

أحدث دهور الأرض ، ويشمل تقريبا 600 مليون سنة الأخيرة من عمر الأرض ، وهو ممثل بصخور تحتوى على وفرة من الحفريات ؛ نظرا لأنها كانت حياة تحتوى على نوع من الهيكل . وهو ينقسم إلى ثلاثة أحقاب هى حقب الحياة القديمة Paleozoic Era وحقب الحياة الوسطى Mesozoic Era وحقب الحديثة Cenozoic Era .

فوسفوريت **Phosphorite**

صخر رسوبى يتكون أساسا من فوسفات الكالسيوم ، كنوع من معدن الأباتيت فى شكل كسرات وعقيدات ، وهو خام أولى لمعادن الفوسفات والفوسفور.

النطاق المضىء **Photic zone**

المائة المتر العليا تقريبا من ماء البحار والمحيطات ، التى تنفذ فيها كمية من أشعة الشمس ، تكفى لحدوث عملية البناء الضوئى .

عملية البناء الضوئى **Photosynthesis**

عملية تقوم فيها النباتات بمزج الماء وثانى أكسيد الكربون لتكوين كربوهيدرات وأكسيجين .

انفجار الماء البركانى **Phreatic explosion**

ثورة بركانية من بخار الماء شديد السخونة والطين والفتات سببها تمدد البخار الذى يتكون عندما تلامس الصهارة ماءً جوفيا أو ماء بحر .

فيلليت **Phyllite**

صخر متحول شديد التورق متوسط فى درجة التحول بين الاردواز والشست ، ترى فيه المعادن الصفائحية بالعين المجردة ، وتميل صخور الفيليت ؛ لأن يكون لها بريق لامع بسبب وجود بلورات الميكا .

الجيولوجيا الفيزيائية **Physical Geology**

قسم رئيسى من علم الأرض (الجيولوجيا) يشمل دراسة العمليات والقوى التى تعمل على أو تحت سطح الأرض، والمواد (المعادن والصخور والصهارات) التى تشملها وتؤثر فيها تلك العمليات.

بيدالفير **Pedalfer**

نوع شائع من التربة فى المناطق الحارة ، يتميز بوفرة أكاسيد الحديد ومعادن الصلصال ، ترسب فى النطاق-ب بالتجوية .

بيدمنت (سفح جبلى) **Pediment**

سطح مائل يقطع صخر أساس ، ويطلى بطبقة رقيقة ومتقطعة من الطمى ، ينحدر بعيدا عن قاعدة أرض مرتفعة ، ويتكون فى بيئة قاحلة عندما تؤدى التعرية إلى تراجع مقدمة الجبل .

بيدوكال **Pedocal**

نوع شائع من التربة فى المناطق القاحلة ، تتميز من تجمع كربونات الكالسيوم فى النطاق-ب .

بجماتيت **Pegmatite**

صخر نارى متداخل خشن التحبب جدًّا ، يزيد فيه طول الحبيبات عن 3 سنتيمتر ، له تركيب ونسيج الجرانيت، وتتبلور البجماتيت فى المراحل النهائية لتصلب صهارة غنية بالماء .

ماء جوفى جاثم **Perched water body**

جسم مائى يغطى قمة طبقة حابسة للماء ، تقع فوق منسوب الماء الجوفى الرئيسى.

منسوب ماء جاثم **Perched water table**

السطح العلوى لجسم منفصل من الماء الجوفى ، والمنفصل عن جسم الماء الجوفى الرئيسى بصخر ماسك أو حابس aquiclude.

تخلل **Percolation**

حركة الماء الجوفى فى النطاق المشبع .

بريدوتيت **Peridotite**

صخر نارى بلوتونى فوقمافى خشن التحبب ، لونه رمادى داكن ومخضر ، يتكون أساسا من الأوليفين وقليل من البيروكسين والأمفيبول.

عصر **Period (geologic)**

الفترة الزمنية التى تتجمع خلالها صخور النظام system .

تربة الصقيع الدائم **Permafrost**

تجمع متجمد دائما من الثلج والتربة ، يتواجد فى المناطق شديدة البرودة .

نفاذية **Permeability**

مقياس يعبر عن مدى قدرة سائل على النفاذ عبر المواد الصلبة .

علم البيئات القديمة **Paleoecology**

دراسة حفريات الأحياء بالنسبة للبيئات القديمة .

المغناطيسية الأرضية القديمة **Paleomagnetism**

مغناطيسية متبقية فى الصخور القديمة تسجل اتجاه الأقطاب المغناطيسية فى وقت ما فى الماضى .

علم الحفريات **Paleontology**

دراسة الحياة القديمة وتطورها .

تربة قديمة **Paleosol**

تربة تكونت على سطح الأرض ، ثم دفنت لاحقا وحفظت.

حقب الحياة القديمة (الباليوزوى) **Paleozoic**

أقدم أحقاب eras زمان الحياة الظاهرة (الفانيروزوى).

بانجيا **Pangaea**

اسم يطلق على القارة العملاقة التى تكونت من التحام كل الكتل القارية التى كانت توجد فى العصرين البرمى والترياسى والتى تشمل كلا من الجندوانا ولوراسيا .

كثيب قطع مكافىء (بارابولى) **Parabolic dune**

كثيب رملى على شكل حرف U ويكون الجانب المفتوح من الحرف فى اتجاه هبوب الريح ، كما أن الذراعين المتدليين يشيران إلى الاتجاه المواجه للريح .

شبه توافق **Paraconformity**

أحد أنواع عدم التوافق ، يصعب تعرفه ، لأنه يعتمد على اختلاف عمر الطبقات التى تسفله عن تلك التى تعلوه .

ولود **Parent**

نواة ذرة تقوم باضمحلال إشعاعى . قارن بذرة وليدة daughter atom .

حافة قارية مستقرة **Passive continental margin**

حافة قارية توجد فى داخل لوح بعيدا عن حافته .

انصهار جزئى **Partial melting**

جزء من الوشاح أو القشرة ينصهر ليكون الصهارة ، فمثلا يبدو أن الصهارة الانديزيتية تمثل انصهارًا جزئيًّا انتقائيًّا للصوديوم والألومنيوم والسيليكا من مصدر غنى بالحديد والماغنسيوم .

خث (بيت) **Peat**

راسب غير متماسك من البقايا النباتية ، يمثل الخطوة الأولى فى تحول المادة النباتية إلى فحم .

تفريغ غازى **Outgassing**

هجرة الغازات الطيارة والأبخرة عبر البراكين والينابيع الحارة من باطن الأرض إلى سطحها لتكون الغلاف الجوى وماء البحر.

رواسب اكتساح **Outwash**

تكوم متطبق ترسب من ذوبان ماء مجارٍ مائية .

طية مقلوبة **Overturned fold**

طية مالت الطبقات فى أحد جناحيها أكثر من الوضع الرأسى .

بحيرة قوسية (بحيرة قوس الثور) **Oxbow lake**

بحيرة ضحلة ، ذات شكل هلالى ، تغطى فرعا مهملا من مجرى مائى ، تتكون عندما تقطع قناة المجرى منحنى دائرى من النهر ثم تسير فى مجرى مائى أقصر .

أكسدة **Oxidation**

تفاعل كيميائى تفقد فيها الإلكترونات من الذرة وتزيد شحنتها الموجبة ، وهو اتحاد كيميائى بين العنصر والأكسيجين .

مناخ مؤكسد **Oxidizing environment**

بيئة رسوبية تتميز بوجود الأكسيجين ، وتتأكسد فيها البقايا العضوية سريعا إلى ثانى أكسيد الكربون والماء.

أوزون **Ozone**

جزىء O_3 يمتص الأشعة فوق البنفسجية من طبقة الاستراتوسفير .

طبقة الأوزون **Ozone layer**

نطاق فى الغلاف الجوى بين 15 و 30 كم فوق سطح الأرض غنى بالأوزون ، تكوّن بسبب انشطار جزىء أكسيجين بالأشعة فوق البنفسجية ، ثم تتحد ذرة الأكسجين تلك بجزيء أكسيجين آخر ، وحيث إن O_3 غير مستقر فإنه يتكسر مرة ثانية . وهذه من العمليات المستقرة ، لأن الأوزون يتكون بمعدل تكسره نفسه. كما يوجد مصدر آخر مهم للتغذية العكسية ، حيث تمنع طبقة الأوزون معظم الأشعة فوق البنفسجية القاتلة من الوصول إلى سطح الأرض، مما يجعل الأرض صالحة للحياة.

P

باهوى هوى **Pahoehoe**

فيض لابى ذو سطح لزج وناعم ، مجدول فى طيات ملتفة تشبه الحبل ، تتكون عادة من البازلت .

صخور الأوفيوليت قاع بحر عميق مرفوع ، ويعتقد أنه يصاحب حدود الألواح المتقاربة .

خام (ركاز) Ore

تجمع من المعادن التى تكون عادة فلزية يمكن أن يستخرج منه معدن أو أكثر له قيمة اقتصادية . ويستخدم المصطلح أيضا لبعض المعادن غير الفلزية مثل الكبريت أو الفلوريت .

راسب عضوى Organic sediment

راسب أو صخر رسوبى يتكون كليا أو جزئيا من رواسب عضوية غنية بالكربون تكونت من تحلل مادة ذات أصل عضوى بعد دفنها ، ويشمل الفحم والطفل الغنى بالكربون .

أفقية أصلية Original horizontality

ترسب الرواسب تحت الماء فى طبقات أفقية أو شبه أفقية موازية لسطح الأرض .

Original lateral continuity الاستمرارية الجانبية الأصلية

استنتاج الامتداد الأصلى للطبقات التى تجوت جزئيا الآن . ويجب معرفة هذا الامتداد لاستنتاج امتداد اليابس والماء فى الماضى ، أو لبناء التراكيب ، التى تجوت بشدة مثل الأقواس الرسيخية cratonic arches.

أحزمة تجبل Orogenic belts

انظر أوروجين orogens.

أوروجين Orogen

مناطق طولية أو مقوسة من القشرة الأرضية طويت وتصدعت بشدة ، وازداد سمكها بسبب التصادمات القارية لفترة زمنية طويلة. وقد تكون مواضع تقارب واندساس subduction ألواح الغلاف الصخري، وتتميز بالبراكين الأنديزيتية والباثوليثات الجرانيتية والمدود الجبلية mountain ranges .

تجبل ، بناء الجبال Orogeny

عملية تشوهت خلالها مناطق واسعة من القشرة الأرضية ، ورفعت لتكون جبالاً .

منكشف Outcrop

انظر منكشف طبقى exposure .

لب خارجى Outer core

الجزء الخارجى من لب الأرض ، وهو يكون منصهرا.

الحيود المحيطية Oceanic ridges

انظر حيد وسط المحيط midocean ridges.

المرتفع المحيطى Oceanic rise

انظر حيود وسط المحيط midocean ridges.

زيت Oil

الجزء السائل من البترول .

حقل بترول Oilfield

مجموعة من أحواض البترول ، تكون متشابهة عادة ، أو حوض واحد فى وضع منعزل .

تجمع زيتى Oil pool

تجمع من الزيت والغاز تحت سطحى ، فى خزان محدد بحاجز جيولوجى .

طفل الزيت Oil shale

طفل داكن اللون ، يحتوى على مواد عضوية شبه شمعية ، تتحلل إلى هيدروكربونات سائلة وغازية عند تسخينها .

مصيدة بترولية Oil trap

تركيب تكتونى أو رسوبى تمنع حركة الزيت أو الغاز لأعلى ، بينما تسمح بالتجمع خلف حاجز .

سرء ، بطروخى Oolite

صخر رسوبى له تركيب الحجر الجيرى ، يتكون من مكورات متوسط قطرها 1 مم تسمى بطروخيات تتكون من طبقات دائرية ميكروسكوبية ، ترسبت من مياه ضحلة فوق مشبعة ، كما تدحرجت الحبيبات بشدة تحت تأثير الأمواج والتيارات .

حجر جيرى بطروخى Oolitic limestone

صخر رسوبى يتكون من تجمعات لأجسام جيرية دقيقة مستديرة يطلق عليها البطروخيات (السرئيات) oolites.

طية مفتوحة Open fold

طية يكون ميل طرفيها (جناحيها) لطيفا ومتساويا ، وبعيدا عن المحور .

مجموعة أوفيوليتية Ophiolite suite

مصطلح أوروبى يطلق على تتابعات توجد فى كثير من أحزمة الجبال ، تتكون من ثلاث طبقات من الصخور ، طبقة عليا من البازلت الوسائدى pillow basalt ونطاق متوسط من القواطع الصفائحية sheeted dykes وطبقة سفلى من الجابرو ، وتمثل

Mudflow انسياب طينى

كتلة منسابة ، تتكون أساسا من مادة صخرية دقيقة الحبيبات ، بها ما يكفى من الماء ليجعلها فى حالة ذائبة.

Mudstone حجر الطين

صخر رسوبى فتاتى ، يتكون من حبيبات معدنية أدق مـن تلـك التى توجد فى الغرين .

Mylonite ميلونيت

صخر متحول دقيـق التحبـب ، يوجـد عـادة فى صـدوع الـدسر thrust faults وينتج عن التفتيت العنيف لصخور سـابقة أثنـاء حركة الصدع.

N

Nappe structure طية مغتربة

طيات مضطجعة (أفقية) ضخمة تصاحب نطاقات صـدوع دسر thrust faults ، تحركت من مواضعها الأصلية مسافات لاتقـل عن ميل ، حيث تتوضع فوق صـخور أخـرى غريبـة عنهـا عنـد حواف رسيخة craton margins . وفى الأحزمة الحديثـة مثـل الألـب والهيمالايـا أزالـت التجويـة معظـم أجزائهـا باسـتثناء جذورها .

Natural gas غاز طبيعى

مكون بترولى غازى ، يتكون أساسا من الميثان .

Natural levee جسر طبيعى

مرتفع منخفض واسـع ، يتكـون مـن طمـى نـاعم ، تبنيـه ميـاه المجرى المائى ، عندما تفيض على جانبيه أثناء الفيضان .

Nebula سديم

انظر الفرضية السديمية nebular hypothesis.

Nebular hypothesis الفرضية السديمية

إحدى فرضيات نشأة النظام الشمسى، والتى تفترض أن سحابة دوارة من الغاز والرماد والثلج تكثفت وانكمشت لتكون النظام الشمسى (الشمس والكواكب المحيطة) منذ حـوالى 4.6 إلى 5.0 بليون سنة مضت .

Neptunism النبتونيون

نظرية قديمة اقترحها فانر ، وتنص عـلى أن كـل الـصخور بـما فى ذلك الجرانيت والبازلت قد ترسبت فى محيط عالمى قديم.

Neutron نيوترون

جـسيم متعـادل كهربيـا ، تـصل كتلتـه إلى 1833 ضـعف كتلـة الإلكترون .

Nonconformity عدم توافق تباينى

علاقة عدم توافق تفصل صخورا رسـوبية طباقيـة مـن صـخور نارية أو متحولة .

Nonfoliated metamorphic rocks صخور متحولة غير متورقة

صخور متحولة لا يوجد فيها أى تولية محددة للبلورات أو يوجد بهـا توليـة ضـعيفة ، ولـذلك فهـى تظهـر قلـيلا مـن الانفـصام الإردوازى أو الشستوزية أو تنعدم تماما .

Normal fault صدع عادى

صدع تحركت فيه الكتلة العليا إلى أسفل بالنـسبة للكتلـة الـسفلى على مستوى سطح الصدع ، ذو ميل حاد عامة.

Nuclear energy طاقة نووية

طاقة حرارية تنتج أثناء الانشطار أو الاندماج النـووى المـتحكم فيه .

Nucleus (of an atom) نواة الذرة

مجموعة البروتونات والنيترونات الموجودة فى مركز النواة .

O

O - horizon نطق أو

طبقة مجمعة من الدبال humus ، وتمثل الطبقة العليا فى كثير مـن تواجدات التربة .

Obduction امتطاء

تجاوز أو تراكب كتلة سميكة من لوح ما فوق لوح آخر عند حـد لوح متقارب .

Oblique-slip fault صدع مائل الانزلاق

نوع من الصدوع تشمل الحركـة عـلى جانبيـه مـركبتين إحـداهما أفقية والأخرى رأسية .

Obsidian أوبسيديان

صخر نـارى فيـضى داكـن اللـون ، يتكـون كليـا أو جزئيـا مـن الزجاج، وله تركيب فلسى عادة .

Oceanic crust قشرة محيطية

القشرة تحت المحيطات .

Moho **موهو**

انظر انقطاع موهوروفيتش Mohorovičić discontinuity .

Mohorovičić discontinuity **انقطاع موهوروفيتش**

انقطاع زلزالى يميز الحد بين قاعدة القشرة الأرضية crust والوشاح mantle .

Moh's Scale of hardness **مقياس موهز للصلادة**

مقياس للصلادة النسبية للمعادن يتحدد بالخدش ، وينقسم إلى عشر درجات ، تتميز كل منها بمعدن شائع.

Molasse **مولاس**

مصطلح يطلق على الرواسب الفتاتية الخشنة ، التى تحتوى على تطبق متقاطع على نطاق واسع وتراكيب مجرى channel structures وفحم ، وطبقات حمراء أحيانا ، و تكون غير بحرية عادة ، وتصاحب رفع أحزمة الجبال .

Molecule **جزىء**

أصغر وحدة تحمل كل خواص مركب ما .

Monocline **طية أحادية الميل**

انحدار محلى فى تتابع من الطبقات المائلة بانتظام .

Moraine **ركام جليدى (مورين)**

تجمع من الفتات ترسب تحت أو على حافة مثلجة ، ولها سطح لايتفق مع صخر الأساس الذى يسفله .

Mountain chain **سلسلة جبال**

مظهر جيولوجى يمتد طوليا على نطاق واسع ، يتكون من نظم عديدة ليست متشابهة فى الشكل ولا متساوية فى العمر ولكنها تشكل اتجاها محددا .

Mountain range **مد جبلى (ج. مدود)**

سلسلة جبال طولية ، تتواجد كجزء من تتابع من المرتفعات الجبلية الممتدة طوليا ، وشديدة التقارب من بعضها ومتماثلة فى الوضع والاتجاه والعمر والأصل .

Mountain system **منظومة جبال**

مجموعة من المدود الجبلية المتشابهة فى الشكل والتركيب ، وترجع نشأتها إلى الأسباب نفسها.

Mudcracks **تشققات الطين**

تشققات بسبب انكماش الطين الرطب عندما يجف سطحها .

Metasomatism **تحوال**

العملية التى يتغير فيها التركيب الكيميائى للصخور ؛ نتيجة إضافة أو حذف أيونات من المحلول .

Meteoric water **ماء جوى**

ماء المطر والصقيع والبرد والثلج .

Meteorites **نيزك**

أجسام معدنية أو صخرية صغيرة تأتى من الفضاء وتصطدم بسطح كوكب .

Midocean ridges **حيود وسط المحيط**

حيود صخرية مستمرة على قاع المحيط ، يتراوح اتساعها بين عدة مئات إلى عدة آلاف من الكيلومترات، كما يزيد ارتفاعها عن 0.6 كم .

Migmatite **ميجماتيت**

صخر مركب ، يحتوى على بعض الصخور النارية والمتحولة .

Mineral **معدن**

أى مادة صلبة متبلورة ، غير عضوية عادة ، تكونت طبيعيا ، لها تركيب كيميائى ثابت أو متغير فى مدى محدود وبنية بلورية مميزة.

Mineral assemblage **تجمع معدنى**

نوعية ونسب المعادن الموجودة فى صخر ما ، خاصة الصخور النارية والمتحولة .

Mineral deposit **راسب معدنى**

حجم من الصخور يحتوى على وفرة من معدن أو أكثر.

Mineral group **مجموعة معدنية**

معدن يظهر تبادلاً أيونيًا واسعًا دون تغير فى نسبة الكاتيونات إلى الأنيونات .

Mineralogy **علم المعادن**

فرع من الجيولوجيا يهتم بدراسة تصنيف وخواص المعادن وتركيبها وثباتها وطريقة تكونها وأماكن وجودها .

Mineraloid **شبه معدن**

صلب شبه معدن يوجد طبيعيا ، ليس له تركيب بلورى أو تكوين محدد أو كليهما .

Modified Mercalli Scale **مقياس ميركالى المعدل**

مقياس يستخدم لمقارنة الزلازل بناء على شدة تدميرها.

شاذات مغناطيسية — **Magnetic anomalies**

أى اختلافات محلية عن الشدة العادية (بالزيادة أو بالنقصان) للمجال المغناطيسى للأرض ، مثل خطوط الشاذات الضيقة الموجبة والسالبة على قاع المحيط الموازية لحيود وسط المحيط .

قدر الزلزال — **Magnitude**

انظر مقياس ريختر .

الوشاح — **Mantle**

النطاق السميك والكثيف ، والمكون من مادة صخرية تحيط بلب الأرض .

رخام — **Marble**

صخر متحول عن الحجر الجيرى ، يتكون أساسا من الكالسيت.

رقم الكتلة — **Mass number**

مجموع البروتونات والنيترونات فى نواة الذرة .

انهيال كتلى — **Mass wasting**

حركة الحطام الصخرى (الأديم) على المنحدر تحت تأثير الجاذبية الأرضية دون مساعدة من وسط ناقل .

انقطاع – إم — **M-discontinuity**

انظر انقطاع موهوروفيتش Mohorovičić discontinuity .

منعطف — **Meander**

انحناء أو ثنية فى مجرى نهر على شكل العروة .

تشوه ميكانيكى — **Mechanical deformation**

تغيرات فى نسيج صخر بسبب الطحن grinding أو الجرش crushing أو نمو التورق foliation أثناء التحول.

ميلانج — **Mélange**

خليط غير متجانس من مواد صخرية ، تكون الكسرات الصخرية فيه مختلفة التركيب والحجم والنسيج ، واختلطت وتصلدت نتيجة ضغط هائل عند حدود الألواح المتقاربة.

مقياس ميركالى — **Mercalli Scale**

انظر مقياس ميركالى المعدل .

ميسا (ربوة) — **Mesa**

شكل تضاريسى صحراوى ، عبارة عن أرض مرتفعة تشبه المنضدة ، ذو قمة مستوية من صخور مقاومة للتعرية وجوانب حادة ، أكبر من التل النضيد butte .

الغلاف الأوسط — **Mesosphere**

منطقة تقع بين قاعدة الأسثينوسفير والحد الفاصل بين اللب والوشاح .

حقب الحياة الوسطى — **Mesozoic**

الحقب المتوسط فى زمان الحياة الظاهرة .

رابطة فلزية — **Metallic bond**

نوع من الرابطة التساهمية بين الذرات ، تتشارك فيها الالكترونات الحرة المتحركة بين أيونات العناصر الفلزية ، التى لها القدرة على فقد الالكترونات وتتحد معا ككاتيونات .

أقاليم معدنية — **Metallogenic provinces**

مناطق محدودة من القشرة توجد فيها الرواسب المعدنية بأعداد كبيرة .

هالة تحول — **Metamorphic aureole**

نطاق أو قشرة من الصخور المتحولة نتجت عن تحول تماسى وتحيط بمتداخل نارى .

سحنات تحول — **Metamorphic facies**

تجمع من الصخور المتحولة يتكون كل منها من مجموعة من المعادن وصلت لحالة الاتزان أثناء التحول خلال مدى محدد من الظروف الفيزيائية (درجات حرارة وضغط) التابعة للسحنة المتحولة نفسها ، ويتغير التجمع المعدنى فى كل صخر عند الانتقال من سحنة لأخرى نتيجة التفاعل بين المعادن (وذلك للتركيب الكيميائى نفسه) .

رتبة التحول — **Metamorphic grade**

انظر رتبة grade (تحول metamorphisl) .

صخر متحول — **Metamorphic rock**

صخر تحولت مكوناته الأصلية أو أنسجته أو كليهما إلى مكونات وأنسجة جديدة من خلال تفاعلات فى الحالة الصلبة كنتيجة للضغط العالى أو الحرارة العالية أو كليهما.

نطاقات تحول — **Metamorphic zones**

مناطق على الخريطة تقع بين خطوط تساوى رتبة التحول.

تحول — **Metamorphism**

كل التغيرات التى تحدث فى المحتوى المعدنى ونسيج الصخر الرسوبى أو النارى فى الحالة الصلبة فى القشرة الأرضية كنتيجة للتغير فى درجة الحرارة والضغط .

Longitude **خط طول**

جزء من شبكة تستخدم فى وصف المواضع على سطح الأرض ، تتكون من أنصاف دوائر تصل بين أقطاب الأرض ، وتسمى أنصاف الدوائر بخطوط الطول meridians.

Low grade of metamorphism **تحول منخفض الرتبة**

التحول تحت ظروف من الضغط والحرارة المنخفضين.

Low velocity zone **نطاق السرعة المنخفضة**

نطاق فى الوشاح العلوى (تحت عمق 100 إلى 350 كم) يحدد قاعدة الغلاف الصخرى . ويتميز هذا النطاق بأن سرعة الموجات الزلزالية فيه تكون أقل منها أعلاه أو أسفله ، مما يدل على قلة جسوءته (صلابته) . ويبدو أن معظم حركات ألواح الغلاف الصخرى تتركز فى هذا النطاق .

Luster **بريق**

درجة وشدة انعكاس الضوء من سطح معدن ، ويوصف بصفات مثل مطفى (dull) ، أو زجاجى أو معدنى .

M

Mafic **مافى**

مصطلح يطلق على المعادن داكنة اللون الغنية فى الحديد والماغنسيوم ، وفقيرة فى السيليكا (مثل البيروكسين والأمفيبول أو الأوليفين) ، كما يطلق أيضا على الصخور الغنية فى المعادن المافية .

Magma **صهارة**

مادة صخرية منصهرة بها حبيبات معادن عالقة وغازات ذائبة ، تتكون عندما ترتفع درجة الحرارة ويحدث الانصهار فى الوشاح والقشرة .

Magma chamber **غرفة صهارة**

تجويف فى الغلاف الصخرى ، ممتلئ بالصهارة.

Magmatic arc **قوس صهارى**

سلسلة منحنية من النشاط النارى تقع فوق نطاق اندساس ، موازية لخندق محيطى ومنفصلة عنه بـ 100 إلى 400 كم .

Magmatic mineral deposit **راسب معدنى صهارى**

أى تركيز معدنى محدود ، تكون نتيجة لعمليات صهارية فى الصخر النارى .

Liquefaction **إسالة**

الإسالة السريعة لراسب نتيجة لصدمة مفاجئة مثل زلزال .

Limbs **طرفى الطية**

جناحا الطية على جانبى المستوى المحورى axial plane .

Limestone **حجر جيرى**

صخر رسوبى يتكون من كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) ، ويتكون أساسًا من فتات هياكل الحفريات اللافقارية .

Linear dune **كثيب طولى**

كثيب رملى هوائى على شكل حيد طولى ، يكون موازيًا تقريبًا لاتجاه الريح السائدة .

Lithification **تصخر**

عمليات التحول الفيزيائى والكيميائى ، التى تؤدى إلى لحام وتصلد راسب ليصبح صخرًا رسوبيًّا .

Lithology **علم الخصائص الصخرية ، الليثولوجيا**

مجموع خواص الصخر ، وتشمل النسيج والتركيب والمكونات الحفرية واللون وغيرها .

Lithosphere **الغلاف الصخرى (الليثوسفير)**

الجزء الخارجى الصلب للأرض ، ويقع فوق نطاق سرعة الموجات الزلزالية ، ويشمل الجزء العلوى من الوشاح mantle والقشرة القارية والمحيطية .

Lithospheric plates **ألواح الغلاف الصخرى**

وحدات الغلاف الصخرى ، كبيرة وغير منتظمة وتشبه الألواح، حددت حوافها اليوم بنطاقات الزلازل النشطة الرئيسية .

Load **حمولة**

المادة التى تتحرك أو تنقل بواسطة عوامل نقل طبيعية مثل المجارى المائية أو الرياح أو الثالج أو الأمواج أو التيارات البحرية .

Local base level **مستوى أساس محلى**

أى مستوى أساسى غير مستوى سطح البحر ، لا يستطيع المجرى أسفل هذا المستوى تجوية الأرض .

Loess **لويس**

راسب هوائى غير متطبق ، غنى بمعادن الصلصال والرمل الناعم .

Landslide انزلاق أرضى

حركة محسوسة لكتلة صخرية أو حطام صخرى (أديم) regolith أو خليط من كليهما على منحدر .

Lapilli لوبيات (حصى بركانى)

تفرا tephra يتراوح حجم حبيباتها بين 2 و 64 مم .

Laramide orogeny تجبل لاراميد

حركة أرضية بانية للجبال فى الكولدليرا ، امتد تأثيرها من نهاية العصر الطباشيرى حتى الإيوسين الأوسط ، أدت إلى رفع صخور القاعدة العميقة فى منطقة جبال روكى ، مما أدى إلى تكوين جبال ضخمة تحصر بينها أحواضًا عميقة .

Laterite لاتيريت

تربة حمراء داكنة مميزة ، تكونت فى مناطق رطبة بها نسبة عالية من الألومنيوم والحديد ، ونتجت عن تجوية كيميائية سريعة لمعادن الفلسبار .

Latitude خط عرض

جزء من شبكة تستخدم فى وصف المواضع على سطح الأرض ، وتتكون من دوائر متوازية تسمى خطوط العرض .

Laurasia لوراسيا

الجزء الشمالى من قارة البانجيا كانت فى حقب الحياة القديمة المتأخرة ، تشمل قارات أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا الحالية .

Lava لابة

صهارة وصلت إلى سطح الأرض عبر عنق بركان .

Leaching غسل

الإزالة المستمرة بالمحاليل المائية للمواد القابلة للذوبان من صخور الأساس أو الحطام الصخرى (الأديم) .

Left lateral fault صدى يسارى الزلة

صدع مضربى الزلة تكون الإزاحة عليه بالصورة التى تبدو فيها على الخريطة، وكأن الجانب المواجه للمشاهد قد أزيح إلى يساره .

Levee جسر

مرتفع على ضفة نهر ، تكون من رواسب خلفتها مياه الفيضان عندما تخف سرعتها .

Lignite لجنيت

فحم منخفض الرتبة له قيمة سعرية carolific value بين البيت والفحم البيتومينى .

Kerogen كيروجين

مادة عضوية غير قابلة للذوبان ، تشبه الشمع ، وتوجد فى الصخور الرسوبية وخاصة الطفل .

Key bed طبقة دالة

طبقة رقيقة منتشرة ، لها سمات رسوبية مميزة ، مما يسهل تعرفها ، ويميزها عن غيرها من الطبقات.

Kimberlite كمبرليت

نوع من البريدوتيت الفوقالمافى ومعه معادن الضغط المرتفع مثل الماس ، وينشأ عن التداخلات الانفجارية السريعة من الوشاح فى القشرة.

Kimberlite pipes أنابيب كمبرليت

كتل ضيقة من الصخور النارية تشبه الأنابيب ، تحتوى أحيانا على الماس ، وتتداخل فى القشرة بينما تنشأ فى الوشاح العميق .

Kinetic energy طاقة الحركة

الطاقة الناشئة عن الجسم المتحرك .

L

Laccolith لاكوليث

متدخل نارى pluton عدسى الشكل ، تداخل موازيا لأسطح طباقية الصخور المتداخل فيها ، كما تتقوس طبقات صخور الإقليم لتكون قبة .

Lacustrine بُحَيرى

مختص بالبحيرة أو نتج عنها أو تكون فيها .

Lagoon لاجون

شرم فى الشاطئ خلف شعب أو جزيرة موازية للشاطئ .

Lahar لاهار (انسياب طين بركانى)

سريان طينى يتكون من رماد بركانى غير متماسك وتراب وبريشيا وجلاميد ، وينشأ عندما تختلط رواسب الفتات النارى pyroclastic أو اللابة بالمطر أو بماء بحيرة أو نهر أو ثلج ذائب .

Laminar flow انسياب رقائقى (صفائحى)

انسياب تكون فيه المسارات مستقيمة أو منحنية بلطف ومتوازية، دون أن تختلط أو تتقاطع .

Landform مظهر تضاريسى

مظهر تضاريسى مميز على سطح الأرض ، اكتسب شكله بسبب عمليات التعرية والترسيب ، مثل الوادى والتل .

Isograd أيزوجراد (خط تساوى رتب التحول)

خط على خريطة يصل بين النقاط التى تمثل بداية ظهور معدن ما فى صخر متحول .

Isostasy توازن الكتل ، أيزوستاسى

الخاصية الأساسية للتوازن الطفوى بين أجزاء الغلاف الصخرى.

Isotopes نظائر

ذرات عنصر لها العدد الذرى نفسه ، وتختلف فى أعداد الكتلة .

Isotopic dating تقدير عمر

تقدير عمر صخر أو معدن باستخدام النظائر المشعة. وفى الحالة العادية ، فإن نسبة النظير المشع إلى النظير غير المشع فى المعدن مضروبة فى معدل التحلل تحدد الفترة الزمنية التى انقضت منذ كان النظير المشع يكون كل لمعدن ، أى منذ تكون المعدن أو عمره.

J

Joint فاصل

كسر فى الصخر ، لا يظهر أى حركة للكتلتين على جانبيه.

Jovian planets كواكب جوفيانية

كواكب ضخمة تقع فى المناطق الخارجية للنظام الشمسى ، والتى تتميز بكتل ضخمة ، وكثافة منخفضة وغلاف هوائى سميك يتكون أساسا من الهيدروجين والهيليوم .

K

K- horizon نطاق ك

نطاق تربة يوجد فى بعض المناطق الجافة تحت النطاق ب (B) ، ويكون مشبعا بكربونات الكالسيوم .

Kaolinite كاولينيت

معدن شائع من مجموعة معادن الكاولين ، معادلته العامة $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ متآصل مع ديكيت وناكريت.

Karst topography طوبوغرافية الكارست

مجموعة من الأشكال التضاريسية غير المنتظمة ، تتميز بوجود حفر بالوعية sinkholes وكهوف مركبة caverns وانعدام المجارى المائية السطحية ، وتتكون فى المناطق الرطبة عندما تذاب وتنثقب صخر الأساس الكربوناتية بالمياه الجوفية .

Intermediate grade of metamorphism
تحول متوسط الرتبة

التحول تحت ظروف انتقالية من الضغط والحرارة .

Internal processes العمليات الداخلية

كل النشاطات التى يشملها حركة أو التغير الكيميائى والفيزيائى فى صخور باطن الأرض .

Intrusive igneous rock صخر نارى متداخل

أى صخر نارى تكون من تصلد الصهارة تحت سطح الأرض .

Ion أيون

ذرة أو مجموعة من الذرات ، اكتسبت أو فقدت الكترونات ، ولهذا فهى تحمل شحنة كهربية .

Ionic bond رابطة أيونية

رابطة تكونت بالجذب الإلكتروستاتيكى بين أيونات تحمل شحنات مختلفة .

Iridium إيريديوم

معدن أرضى شحيح ، يقع فى مجموعة معادن البلاتين، نضب من القشرة الأرضية ، لكنه أكثر انتشارا فى الوشاح والنيازك . يستخدم انتشاره عند الحد الفاصل بين العصرين الطباشيرى والثالث كدليل على ارتطام الأرض بجرم سماوى .

Iron Formation متكون حديد

صخر رسوبى صفيحى أو مترقق بانتظام ، تتبادل فيه راقات الحديد مع طبقات من الشرت أو الجير، ويحتوى على وفرة من الحديد تزيد عادة عن 15 ٪ ، فى صورة كبريتيد أو أكسيد أو هيدروكسيد أو كربونات ،حيث يكون خام الحديد منخفض الرتبة . ويوجد فقط فى زمان الحياة المستترة .

Island arc قوس جزر

سلسلة طولية أو قوسية الشكل ، تتكون من جزر بركانية متوضعة على القشرة المحيطية ، ويتكون قوس الجزر فى اللوح الراكب overriding plate من الصهارة الصاعدة نتيجة اندساس لوح محيطى تحت لوح محيطى آخر ، ويكون موازيا لخندق محيطى عميق ومنفصل عنه بمسافة تتراوح بين 150 و 300 كم .

Isoclinal fold طية متفقة الميل

طية يكون جناحاها متوازيين .

صخر نارى **Igneous rock**

صخر تكون من تبرد وتصلد الصهارة .

إجنمبريت **Ignimbrite**

نوع من الصخور النارية الفتاتية pyroclastic rocks، تكون نتيجة الترسيب من سحابة متوهجة nueé ardentes عند درجات حرارة عالية ، ويتكون من طبقات رديئة الفرز من طف متصلب يشتمل على البيوميس والحصى البركانى وكسرات من البلورات والصخور ، فى أرضية من كسرات زجاجية ، ملتحمة مع بعضها عادة . ويتراوح تركيب الإجنمبرايت بين حمضى إلى متوسط ، كما يتميز بنسيج مخطط . مرادف طف ملتحم welded tuff .

حفرية مرشدة (دالة) **Index fossil**

حفرية يمكن أن تستخدم فى تعرف وتقدير عمر الطبقات التى تحتويها ، كما تفيد أيضا فى المضاهاة بين الوحدات الصخرية .

معدن دال **Index mineral**

معدن يوجد فى تتابع مكون من الصخور المتحولة ، تدل بداية ظهوره على الحد الخارجى لنطاق تحول محدد .

قصور ذاتى **Inertia**

المقاومة التى تبديها كتلة ما للحركة المفاجئة .

تسرب **Infiltration**

حركة المياه الجوفية ، أو المياه الحارة فى صخر أو تربة عبر المسام والفواصل .

مجرى مائى مؤثر (نهر مغذى) **Influent stream**

مجرى مائى أو جزء منه ، يعمل على إعادة الماء الجوفى عبر قاعه الذى يكون أكثر ارتفاعا من مستوى الماء الجوفى فى المنطقة .

اللب الداخلى **Inner core**

الجزء الصلب المركزى فى قلب الأرض .

جبل منعزل (جزيرى) **Inselberg**

جبل أو مرتفع أو تل مفرد ، حاد الجوانب يرتفع فجأة عن المناطق المنبسطة المجاورة .

تداخل سحنى لسانى **Intertonguing facies**

سحنتان رسوبيتان مثل الرمل والطفل بينهما علاقة جانبية متدرجة من إحداهما إلى الأخرى ، بحيث يتداخل لسان طويل من أحدهما فى الآخر . وتعكس هذه الألسنة تكرار التحرك الجانبى لبيئات الترسيب المتجاورة أثناء ترسيب كلتا السحنتين .

الغلاف المائى **Hydrosphere**

مجموع الماء الأرضى ، ويشمل المحيطات والبحيرات والأنهار والماء الجوفى والثلج والجليد والمثالج .

نشاط حرمائى **Hydrothermal activity**

أى عملية تشمل مياه جوفية ذات درجة حرارة عالية ، وخصوصا تحول المعادن وتكوين نقاط ساخنة hot springs وينابيع حارة (فورارات) geysers .

تحول حرمائى **Hydrothermal metamorphism**

نوع من التحول ، يحدث عادة عند الحيود وسط المحيطية ، حيث تخرج السوائل الحارة عند القمة ، وتعمل على تحول الصخور المجاورة لها .

راسب حرمائى **Hydrothermal mineral deposit**

أى تركيز معدنى محلى تكون بالترسيب من محلول ساخن.

محاليل حرمائية **Hydrothermal solutions**

محاليل ساخنة تنشأ عن تبرد الصهارات أو نتيجة للتفاعل بين صخر ساخن والماء المحيط ؛ مما يؤدى إلى تركيز خامات معدنية .

عرق حرمائى **Hydrothermal vein**

مجموعة من المعادن ترسبت عن المحاليل الحارة فى تجويف صخرى .

I

انفصال جبل جليد **Iceberg calving**

تفتت كتل من المثلج ، عندما تتحرك إلى الشاطئ لتكون جبال جليدية.

قلنسوة جليدية **Ice cap**

جسم من الثلج والجليد يشبه القبة يغطى قمم الجبال العالية ، وأيضا الأراضى المنخفضة عند خطوط العرض العليا بالقرب من المناطق القطبية حيث تظهر انسيابا شعاعيا للخارج . وتكون القلنسوة الجليدية أصغر حجما من الفريشة الجليدية ice sheet.

فريشة جليدية **Ice sheet**

كتلة سميكة نسبيا من الجليد والثلج فى حجم القارة تكوّن غطاءً متصلا تغمر كل يابس القارة حتى حافتها ، ولا يتوقف على شكل سطح الأرض تحتها ، ويقتصر وجود الفرش الجليدية فى الوقت الحالى على المناطق القطبية (جرينلاند وقارة أنتاركتيكا).

هورنفلس **Hornfels**

صخر متحول عالى الدرجة ، حبيباته متجانسة ، لا يوجد به تورق ، يتكون عادة بسبب تحول تماسى .

جسر (نتق) **Horst**

كتلة طولية مرتفعة من القشرة الأرضية تحدها صدوع عادية normal faults متوازية . انظر خسيف graben.

نقطة ساخنة **Hot spot**

سطح بركانى يشير إلى بلوم نشأ فى الوشاح mantle.

ينبوع حار **Hot spring**

ينبوع تزيد درجة حرارة الماء الخارج منه عن درجة حرارة الإنسان .

دوبال **Humus**

الجزء المتحلل من المادة العضوية فى التربة .

إعصار **Hurricane**

عاصفة استوائية هوجاء تزيد سرعة الرياح فيها 120 كم/ ساعة.

تميؤ **Hydration**

امتصاص المعدن للماء أثناء التجوية .

تدرج هيدروليكى **Hydraulic gradient**

قيمة انحدار منسوب الماء الجوفى water table ، ويتحدد من قياس الفرق فى الارتفاع بين نقطتين تقعان على مساره .

هيدروكربون **Hydrocarbon**

أى مركب عضوى (غازى أو سائل أو صلب) يتكون كلية من الكربون والهيدروجين .

دورة الماء **Hydrologic cycle**

الحركة الدورية للماء بين المحيط والغلاف الجوى ، حيث ينزل الماء أثناء المطر إلى سطح الأرض ، حيث تحمله المجارى المائية إلى البحر .

علم المياه **Hydrology**

العلم الذى يدرس جزء الدورة المائية بين سقوط المطر وعودة الماء إلى البحر ؛ أى دراسة حركة الماء وخصائصه فوق وداخل الأرض .

تحلل مائى **Hydrolysis**

تفاعل كيميائى تحل فيه أيونات الهيدروجين الموجبة أو الهيدروكسيد السالبة من الماء محل أيونات المعدن .

عينة صخرية **Hand specimen**

عينة صخرية بحجم مناسب لتحمل فى اليد لتدرس .

وادٍ معلق **Hanging valley**

وادى يخلفه رافد tributary من مثلجة ذائبة يقابل واديًا مثلجيًّا أكبر حجما حيث يكون قاع الرافد أعلى من قاع الوادى الرئيسى .

حائط علوى **Hanging-wall block**

الكتلة الصخرية الموجودة فوق سطح الصدع المائل .

صلادة **Hardness**

مقاومة المعدن النسبية للخدش .

ماء عسر **Hard water**

ماء يحتوى على نسبة أكبر من المعتاد من كربونات الكالسيوم .

زيت ثقيل **Heavy oil**

زيت بترول خام له كثافة API ، أو كثافة بوميه منخفضة .

التجبل الهرسينى **Hercynian orogeny**

حركة أرضية بانية للجبال فى الباليوزوى المتأخر تأثرت بها معظم أوروبا وجنوب آسيا ، وهى تكافئ تقريبا تجبل الأبالاش فى أمريكا الشمالية وحزام جبال الأورال بين أوروبا وسيبيريا .

ثغرة ترسيب (ثلمة) **Hiatus**

الفترة الزمنية المقابلة لعدم التوافق unconformity ، والتى تنشأ بسبب عدم الترسيب بداية ، أو أنه ترسب ثم أزيل بالتجوية ، أو هو غياب لفترة زمنية من السجل الطبقى .

تحول عالى الرتبة **High grade of metamorphism**

التحول تحت ظروف من الحرارة والضغط المرتفعين.

صدع مفصلى **Hinge fault**

صدع تكون حركة أحد جانبيه دورانية على محور متعامد على مستوى الصدع وتتلاشى إزاحته ، كلما تحركنا بعيدا على مضربه وتنتهى تماما عند نقطة معينة .

جيولوجيا تاريخية **Historical Geology**

دراسة الترتيب الزمنى للأحداث الفيزيائية والبيولوجية الماضية فى تاريخ الأرض .

قرن جليدى **Horn**

قمة حادة مرتفعة هرمية الشكل ذات جوانب شديدة الانحدار ، تنتج من تقاطع حوائط ثلاث دارات جليدية cirques أو أكثر فى قمة الجبل .

الزجاجية) الموجات تحت الحمراء المنعكسة من سطح الأرض ؛ مما يؤدى إلى حبس الطاقة الشمسية وارتفاع درجة الحرارة .

غازات الدفيئة **Greenhouse gases**

غازات الغلاف الجوى التى تسبب ظاهرة الدفيئة الزجاجية مثل بخار الماء H_2O وثانى أكسيد الكربون CO_2 والميثان CH_4 و CFCs .

شست أخضر **Greenschist**

صخر متحول منخفض الدرجة ، غنى بالكلوريت والأبيدوت .

أحزمة الحجر الأخضر **Greenstone belts**

نطاقات فى القشرة الأرضية (تتبع الدهر الأركى أساسا) تتميز بوجود صخور بركانية تتميز بدرجة تحول منخفضة ، ويصاحبها صخور رسوبية فتاتية غير ناضجة .

أرضية **Groundmass**

مادة لاحمة دقيقة التحبب .

ماء جوفى **Groundwater**

كل الماء الموجود فى فراغات الصخور تحت النطاق غير المشبع .

منسوب الماء الجوفى **Groundwater table**

السطح العلوى للنطاق المشبع بالماء الجوفى .

جيوت **Guyot**

جبل بركانى مفرد ، شاهق الارتفاع وذو قمة مستوية، ويوجد تحت سطح الماء العميق .

H

دهر الهاديان **Hadean**

دهر eon يتبع زمان ما قبل الكمبرى ، وهو أقدم أزمنة العمود الجيولوجى .

نصف أخدود **Half-graben**

تركيب يشبه الخندق ، يتكون عندما يتحرك الحائط المعلق لأسفل على سطح صدع مائل .

عمر النصف **Half-life**

الزمن اللازم لاضمحلال نصف المادة المشعة الموجودة فى عينة مادة مشعة إلى النظير isotope غير المشع . حيث سيتبقى بعد فترة عمر نصف واحدة 50 ٪ من المادة المشعة ، وبعد فترتى عمر نصف سيتبقى 25٪ من المادة المشعة ، وهكذا.

جرانيت **Granite**

صخر نارى متداخل خشن التحبب ، يحتوى على كوارتز وفلسبار بوتاسى وبلاجيوكلاز صودى ، ويكون الفلسبار البوتاسى أكثر انتشارًا من البلاجيوكليز ، بالإضافة إلى كميات من الميكا (بيوتيت و/ أو مسكوفيت) وغيرها من المعادن الإضافية .

جرنتة **Granitization**

تكوين جرانيت نتيجة التحول من صخور أخرى بإعادة البلورة بالانصهار الكامل أو دونه .

جرانوديوريت **Granodiorite**

صخر نارى متداخل فاتح اللون خشن التحبب يشبه الجرانيت ، ولكن يكون فيه البلاجيوكليز أكثر وفرة من الفلسبار البوتاسى. ويوجد بعض الهورنبلند والبيوتيت ونادرا البيروكسين من المعادن الحديدوماغنيسية .

جرانيوليت **Granulite**

صخر نارى متحول ، على درجة عالية من التحول ، خشن التحبب عادة ، ومتورق قليلا ، يحتوى على البيروكسينات والفلسبارات والجارنت .

جرول **Gravel**

أخشن راسب فتاتى ، ويتكون غالبا من حبيبات أكبر من 2 مم وتشمل الحصى pebbles والزلط cobbles والجلاميد boulders.

جرافيمتر (مقياس التثاقل) **Gravimeter**

آلة حساسة لقياس قوة الجاذبية فى أى مكان على الأرض.

شاذة تثاقلية **Gravity anomaly**

اختلافات فى قوة الجاذبية بعد عمل تصويبات خط الطول والعرض .

جرايواكى **Graywacke**

حجر رملى ذو لون داكن غير متجانس الحبيبات ، وغير ناضج نسيجيا . يحتوى على الكوارتز والفلسبار وكمية كبيرة من كسرات صخرية دقيقة

تأثير الدفيئة (الصوبة الزجاجية) **Greenhouse effect**

خاصية مناخ الأرض التى يحبس أو يعكس فيها الغلاف الجوى المحتوى على بخار الماء وثانى أكسيد الكربون (أو زجاج الصوبة

زجاجى **Glassy**

مصطلح يدل على أن المادة لا تحتوى على ترتيب للذرات فى أشكال ثلاثية الأبعاد (مادة غير متبلورة) .

فلورة جلوسوبتيريس **Glossopteris flora**

تشير إلى شجرة من عاريات البذور كانت تنتشر فى مناطق الغابات المعتدلة فى قارة الجندوانا الجنوبية خلال حقب الحياة القديمة المتأخر وبداية حقب الحياة الوسطى .

نيس **Gneiss**

صخر متحول على درجة عالية من التحول ، خشن التحبب عادة ومتورق ، يتغير التركيب المعدنى فيه من راق إلى راق ، والانفصام غير كامل .

أرض الجندوانا **Gondwanaland**

الجزء الجنوبى من القارة العملاقة القديمة المسماة بالبانجيا ، والتى تكونت فى حقب الحياة القديمة المتأخرة ، قبل أن تتكسر بالقوى التى سببت الانجراف القارى continental drift ، وتتكون من أستراليا الحالية والهند وأفريقيا وأمريكا الجنوبية والقارة القطبية الجنوبية .

أخدود **Graben (Rift)**

تركيب يشبه الخندق يتكون عندما تهبط كتلة صخرية بين صدعين عاديين normal faults بالنسبة لما يحيط بها من كتل صخرية .

رتبة (مستوى تركيز) **Grade (ore)**

مصطلح يطلق على درجة تركيز المعدن (فلز أو فلزات) فى الخام ore ، ويعبر عنه عادة بنسبة .

رتبة (تحول) **Grade (metamorphism)**

المستوى الذى وصلت إليه عملية التحول ، مقاسة بكمية أو درجة الاختلاف عن الصخر الأصلى ، والصخر المتحول الناتج عنه .

تطبق متدرج **Graded bedding**

طبقة يتدرج فيها حجم حبيبات الرواسب من الخشن إلى أسفل إلى الناعم إلى أعلى .

انحدار **Gradient**

مقياس للبعد الرأسى فوق مسافة أفقية معطاة .

قعرة أرضية ، جيوسينكلاين **Geosyncline**

حوض ضخم يستقبل رواسب سميكة أثناء هبوطه على امتداد فترات زمنية طويلة .

تدرج حرارة الأرض **Geothermal gradient**

معدل تزايد الحرارة مع العمق فى باطن الأرض ، ويكون هذا المعدل فى حدود 30° م لكل كيلومتر فى قشرة الأرض العلوية .

فوارة ، جيزر **Geyser**

عين حارة تمتلئ بنظام من الرماد والحرارة التى تسبب خروج قذفات متتابعة من الماء والبخار .

منجرف مثلجى **Glacial drift**

راسب تكون مباشرة من المثلجة أو بشكل غير مباشر من الماء الذائب من المثلجة فى جدول أو بحيرة أو بحر ، كما يسمى أيضا منجرفًا drift.

حزوز جليدية **Glacial striations**

خدوش طويلة شبه متوازية على سطح صخر القاع نتيجة لحركة فتات صخرى وجد فى قاعدة مثلجة . كما يطلق على الخدوش الأوسع والأعمق أخاديد جليدية *glacial grooves*.

تثلج **Glaciation**

تغيير سطح الأرض نتيجة تحرك جليد المثلجة .

مثلجة **Glacier**

جسم ضخم دائم من الجليد على سطح الأرض ، تكون أساسا من تبلور ثلج ، وتظهر عليه شواهد حركة سابقة أو حالية على منحدر بسبب ثقل وزنها الخاص، ويتراوح حجمها بين 100م و10000 كم .

تموز مثلجة (اندفاع مدمر) **Glacier surge**

فترة من الحركة السريعة الغير عادية للمثلجة .

جلوكونيت **Glauconite**

معدن أخضر سيليكاتى ، يتكون فى بيئة بحرية ببطء شديد ، بما يسمح بتفاعل كيميائى بطئ بين ماء البحر ومعادن الطين أو الميكا الموجودة على قاع البحر . وحيث إنه يحتوى على بعض البوتاسيوم ، فإنه يستخدم فى تحديد عمر الرواسب باستخدام طريقة البوتاسيوم/ أرجون K/Ar .

زجاج **Glass**

صخر تكون نتيجة لتبرد الصهارة بسرعة ، بحيث لا يتاح للبلورات أن تنمو .

Geochemically abundant elements
العناصر الكيميائية الوفيرة
العناصر الكيميائية التى يمثل كل منها منفردا نسبة 0.1 ٪ أو أكثر من وزن القشرة الأرضية .

Geochemically scarce elements
العناصر الكيميائية الشحيحة
العناصر الكيميائية التى يمثل كل منها منفردا أقل من نسبة 0.1٪ من وزن القشرة الأرضية .

Geologic column **عمود جيولوجى**
شكل مجمع يشمل تاريخ الأرض ، يقوم على الترتيب الزمنى لطبقات الأرض بناءً على محتواها الحفرى أو أى شاهد آخر نسبى أو مطلق .

Geologic cross section **قطاع عرضى جيولوجى**
شكل يوضح ترتيب الصخور والمعادن التى يمكن رؤيتها إذا قطعنا مقطعا رأسيا فى جزء من القشرة الأرضية.

Geologic map **خريطة جيولوجية**
خريطة توضح التوزيع الأفقى للصخور المختلفة أو الأعمار المختلفة فى منطقة ما .

Geologic resources **موارد جيولوجية**
مواد ذات قيمة اقتصادية من أصل جيولوجى ، يمكن استخراجها من الأرض ، سواء التى اكتشفت أو التى لم تكتشف بعد .

Geologic time **زمن جيولوجى**
الفترة الزمنية الممتدة منذ نشأت الأرض إلى الآن ، وهى تقسم إلى فترات زمنية حدثت خلالها الأحداث الجيولوجية المعروفة خلال تاريخ الأرض .

Geologic time scale **مقياس الزمن الجيولوجى**
تقسيم التاريخ الجيولوجى إلى دهور eon وأحقاب eras وعصور periods وأحيان epochs تستخدم فى علوم الطبقات والحفريات .

Geology **الجيولوجيا**
علم دراسة الأرض وتركيبها والمعادن والصخور والتربة المكونة للقشرة الأرضية والعمليات المختلفة التى طرأت ولاتزال تطرأ على كل من سطح الأرض وجوفها ، ودراسة بقايا الكائنات الحية فى صخورها وتتابع طبقاتها واستنتاج تاريخها واستخدام كل ذلك فى تتبع ثرواتها المختلفة .

Fossil fuel **وقود حفرى**
مصطلح عام يطلق على رواسب جيولوجية هيدروكربونية مكثفة ذات أصل عضوى ، وتشمل البترول والفحم والغاز الطبيعى والطفل البترولى oil shale والرمل القطرانى tar sands.

Fractional crystallization **تبلور تجزيئى**
فصل مكونات الصهارة المتبردة بتكوين وإزالة بلوراتها على مراحل تتناسب مع درجة الحرارة .

Fracture (minerals) **مكسر (معادن)**
التكسير غير المنتظم للبلورة عبر أسطح لا توازى وجه البلورة ، وتستخدم للتفرقة بين المعادن .

Fracture **تكسر (تكتونية)**
تشوه دائم فى صخر عندما يتجاوز الإجهاد (الضغط) حد كم من التشوه المرن واللدن .

Fringing reef **شعب متاخم (سجاف)**
شعب مرجانى يتصل مباشرة بكتلة من اليابسة لم يكونها شعب .

Fumarole **داخنة**
ثقب بركانى صغير ، تنبعث منه الغازات والبخار ، وتترسب على جوانبه المعادن .

G

Gabbro **جابرو**
صخر نارى متداخل خشن التحبب له لون رمادى غامق ، يتكون أساسا من فلسبار البلاجيوكليز الغنى بالكالسيوم (لابرادوريت إلى بيتونيت) والكلينوبيروكسين (أوجيت) . وقد يحتوى على معادن الأوليفين والأورثوبيروكسين ، ويخلو من الكوارتز. والجابرو هو المقابل المتداخل لصخور البازلت البركانية .

Gamma rays **أشعة جاما**
موجات كهرومغناطيسية قصيرة جدا ، تنبعث من نويات الذرات أثناء تحولات إشعاعية خاصة .

Gangue **معادن غثة**
المعادن عديمة القيمة الاقتصادية فى الخام.

Geochemical cycle **الدورة الجيوكيميائية**
مجموعة العمليات التى تحمل عنصرًا كيميائيًّا معينًا من خزان إلى خزان آخر فى النظام الأرضى .

طية **Fold**

طبقة أو مجموعة من الطبقات كانت أفقية ثم طويت لاحقا .

محور الطية **Fold axis**

محور يصل كل النقاط على مركز الطية ، ويطوى منه جناحى الطية .

حزام طى **Fold belt**

مرادف لحزام تجبلى orogenic belt .

طى **Folding**

العملية التى تؤدى فيها قوى الضغط الجانبى إلى تشوه القشرة الأرضية ، بحيث تكون الطبقات الأرضية "طيات folds" .

تورق **Foliation**

مجموعة من المستويات الأفقية أو المتموجة فى الصخور المتحولة ، تنتج عن تشوه تركيبى .

الحائط السفلى **Footwall block**

كتلة الصخر أسفل سطح الصدع المائل .

فورامنيفرا **Foraminifera**

مجموعة من الكائنات الحية وحيدة الخلية ، تكون أصدافها معظم الرواسب الكربوناتية فى المحيطات .

حوض أمام قوس **Forearc basin**

حوض يتكون بين القوس البركانى والخندق المحيطى فى نطاق اندساس .

طبقة الواجهة فى الدلتا **Foreset bed**

طبقة من الطبقات المائلة ، توجد فى الطباقية الكاذبة cross-bedding، أو طبقة مائلة ترسبت فى جبهة الدلتا .

متكون **Formation**

الوحدة الصخرية المحلية الرئيسية فى التقسيم الطبقى ، متجانسة لونا ونسيجا ومحتوى حفريًا ، ولها اسم رسمى يشتق من اسم منطقة جغرافية ، وله انتشار جغرافى واسع يسمح بتوقيعه على الخرائط ، مثل متكون المقطم Mokattam Formation .

حفرية **Fossil**

بقايا أو آثار الحياة القديمة ، مثل العظام والأصداف والأسنان ، كما تشمل أيضا مواضع الأقدام والحفر وآثار جر الذيل وغيرها .

ثلج جليدى **Firn**

ثلج قديم كثيف متصلب ، وهو مرحلة انتقالية بين الثلج snow والجليد ice .

مسارات انشطار **Fission tracks**

علامات أو ندوب فى المعادن والزجاج البركانى تنتج عن انشطار تلقائى فى نواة ذرة غير ثابتة ، فيدفع جسيمات الطاقة فى المادة المجاورة . وتعكس كثافة المسارات عدد الذرات المنشطرة ، وبالتالى عمر الصخر الحاوى .

انبثاق شقى **Fissure eruption**

طفح بركانى ، منبثق من شق طولى أكثر منه من ثقب مركزى .

فيورد (ج. فيوردات) **Fjord**

وادى جليدى سابق ، له جوانب حادة ، وعلى شكل حرف U ، ويغطيه البحر حاليا .

فيضان مفاجىء **Flash flood**

فيضان مفاجىء يصاحب عاصفة ممطرة شديدة ويستمر لفترات قصيرة بسبب تدفق كميات ضخمة من الماء ، وينقل خلالها كميات كبيرة من الرواسب.

مجموعة نباتية ، فلورا **Flora**

كل النباتات الموجودة فى منطقة أو زمن ما .

بازلت فيضى **Flood basalt**

هضبة بازلتية ، تمتد منبسطة لعدة كيلومترات بعيدا عن انبثاقات بركانية شقية .

سهل فيضى **Floodplain**

رواسب مفككة متجمعة فى هيئة طباقية أفقية ، تنتشر على جانبى مجرى مائى ، تغمر أثناء الفيضان ، وتتكون من الغرين والرمال التى يحملها المجرى المائى .

فليش **Flysch**

مصطلح عام يطلق على الطبقات الأفقية الواسعة الانتشار، والتى تتكون من تبادلات من الرمل والطفل. وتميز تتابعات الحجر الرملى التى تكونت بالتيارات التعكيرية قبل الاصطدام التجبلى .

بؤرة الزلازل **Focus of earthquake**

الموقع الحقيقى لمصدر الزلزال تحت سطح الأرض . وتميز البؤر الضحلة الحيود المحيطية بينما تميز البؤر العميقة الأقواس البركانية .

External processes العمليات الخارجية

كل النشاطات التى تشمل تجوية ونقل وترسيب المواد المجواة .

Extrusive igneous rock صخر نارى منبثق

صخر تكون من تصلد صهارة انسابت على سطح الأرض .

F

Facies سحنة

انظر السحنات الرسوبية sedimentary facies .

Facies fossil حفرية سحنة

أنواع من الحفريات يكون وجودها قاصرا على نوعية أو سحنة صخرية واحدة (مثل الجربتوليتات فى الطفل الأسود) ، وبالتالى فإنها لا تكون مفيدة فى المضاهاة بين هذه السحنة وغيرها من السحنات .

Fault صدع

كسر مستو أو منحنى قليلا فى القشرة الأرضية ، تنزلق الكتلتان على جانبيه إزاحة نسبية موازية لسطح لكسر.

Fault Block Mountains جبال الكتل الصدعية

جبل تكون عندما تتكسر القشرة الأرضية إلى كتل مختلفة الارتفاع بصدوع عادية normal faults.

Fauna مجموعة حيوانية ، فونا

كل الحيوانات الموجودة فى منطقة ما أو فى فترة زمنية ما،أو كل الأنواع التابعة لقبيلة ما والمتواجدة فى منطقة أو فترة زمنية محددة من الزمن الجيولوجى.

Faunal succession, principle of
التتابع الحفرى ، قاعدة

تتابع الحفريات الحيوانية والنباتية فى تسلسل طباقى محدد معروف .

Felsic فلسى

مصطلح يستخدم لوصف الصخور النارية ذات اللون الفاتح ، وتكون فقيرة فى الحديد والماغنسيوم ، كما تحتوى على وفرة من الفلسبار والكوارتز .

Fermentation تخمر

نشاط بكتيرى يؤدى إلى تحلل الجزيئات العضوية الكبيرة، ويحدث عادة فى ظروف لاهوائية حيث يشح الأكسيجين.

Erosion تعرية

مجموعة من العمليات المعقدة ، يتكسر فيها الصخر فيزيائيا وكيميائيا ، ثم تتحرك الرواسب .

Erratic جلاميد منقولة

فتات صخرى منقول ترسب بالمثلجة ، تختلف فى تركيبها عن طبقة الأساس التى تسفلها .

Eruption column عمود الثوران

خليط من الرماد والغازات الساخنة ، ترتفع كعمود لأعلى فوق بركان ثائر .

Esker كثيب نهر جليدى

حيد ضيق طويل ، جيبى غالبا ، يتكون من ركام متطبق.

Estuary خليج نهرى

جسم شبه مغلق من الماء الساحلى ، يتخفف فيه ماء البحر بماء عذب .

Evaporites متبخرات

صخر رسوبى يتكون أساسا من معادن ترسبت من سائل ملحى بالتبخير .

Evaporite deposits رواسب تبخرية

طبقات من الأملاح ، تترسب كنتيجة للتبخير .

(Evaporite intrusion (salt dome
تداخل تبخرى (قبة ملحية)

تداخل رأسى نتج من انسياب الملح أو الجبس اللدن من طبقة متبخرات مدفونة على عمق كبير ، ويكون غير متوازن إيزوستاتيكيا بسبب أنه أقل لدونة من الطبقات المغطية لها .

Exfoliation تقشر

تفكك القشور المتراكبة ، مثل قشور البصل ، حول قلب صخرى صلب .

Evolution تطور

تغيرات تشريحية فى المجموعات الحية مع الزمن ، بسبب التغير فى جيناتها .

Exploration geology جيولوجيا الاستكشاف

فرع علم الجيولوجيا الذى يهتم باكتشاف موارد جديدة من المعادن المستخدمة .

Exposure (outcrop) منكشف

مكان ، حيث ينكشف صخر أو راسب على سطح الأرض .

Effluent stream مجرى مائى متأثر

مجرى يتلقى الماء من نطاق التشبع الأرضى ، حيث يقع قاع مجراه فى منسوب منخفض عن منسوب الماء الجوفى .

Elastic deformation تشوه مرن

تشوه غير دائم ، يحدث عندما تتمدد وتعصر مادة صلبة مرنة ، ثم تزال القوة المؤثرة عليها .

Elastic rebound theory نظرية الارتداد المرن

النظرية التى تنص على أن الزلازل تحدث بسبب انطلاق الطاقة المختزنة عبر الصدوع .

Electrons الكترونات

جسيمات مشحونة بشحنات سالبة .

Emergence انحسار

زيادة فى مساحة الأرض تظهر فوق مستوى سطح البحر ، وتنتج من ارتفاع اليابس أو هبوط مستوى سطح البحر.

Eolian ريحى

منسوب للرياح ، وخصوصا عمليات التجوية والترسيب ، وأيضا أشكال الأرض والرواسب الناتجة من فعل الرياح.

Eon دهر

أكبر وحدات الزمن الجيولوجى .

Epeiric sea بحر فوق قارى

بحار ضحلة ، تغطى الرسيخات القارية على امتداد العمود الجيولوجى ، وتدعى البحار فوق القارية (epicontinental seas) حيث يعنى مقطع epi فوق.

Epicenter المركز السطحى للزلزال

نقطة على سطح الأرض ، تقع مباشرة فوق بؤرة الزلزال.

Epoch حين

الزمن الذى يترسب خلاله النسق series .

Equilibrium line خط الاتزان

خط يحدد مستوى على المجلدة ، يتساوى عنده الحجم الكلى المفقود والحجم الكلى المكتسب .

Era حقب

وحدة الزمن الجيولوجى ، وهو قسم أصغر من الدهر eon وأكبر من العصر period.

Dripstone حجر التنقيط

راسب تكون كيميائيا من تنقيط الماء فى تجويف ممتلئ بالهواء .

Drumlin تل جليدى

تل منخفض مستطيل ناعم انسيابى ، يأخذ عادة شكل سفينة مقلوبة ، يتكون من الحريث till ، واتجاه استطالته هو اتجاه حركة الجليد .

Ductile deformation تشوه لدن

تشوه دائم لا يعود ، مستنتج فى مادة صلبة ، تعرضت لضغط فوق حد مرونتها ولكن قبل تشققها .

Dune كثيب

مرتفع من الرمل يترسب بالرياح عادة .

E

E horizon مستوى- E

أحد مستويات التربة ، يوجد أحيانا تحت المستوى أو يكون ذا لون رمادى أو أبيض .

Earth flow انسياب ترابى

انسياب حبيبات الحطام الصخرى (الأديم) regolith بسرعات تتراوح بين 10^{-5} و 10^{-1} م/ ث .

Earthquake زلزال

حركة عنيفة فى الأرض ، تحدث بسبب انتقال الموجات الزلزالية المنبعثة من صدع حدثت حركة مفاجئة على امتداده .

Earthquake focus بؤرة الزلزال

النقطة الأولى لانبعاث الطاقة المسببة للزلزال .

Earthquake magnitude قدر الزلزال

انظر مقياس ريختر . Earth ś gravity

الجاذبية الأرضية

قوة تؤثر على الأرض من داخلها ، تعمل بها الأرض على جذب كل الأجسام نحو مركزها .

Eclogite إكلوجيت

صخر متحول خشن التحبب ويتكون من حبيبات متساوية تقريبًا ، يماثل فى تركيبه الكيميائى صخر نارى قاعدى يحتوى على جارنت (بيروب – المندين) وبيروكسين صودى (أمفاسيت) .

Discharge area **منطقة تصريف**

منطقة تصريف الماء الجوفى إلى المجارى المائية أو إلى الماء السطحى .

Disconformity **عدم توافق تخالفى**

سطح تجوية غير منتظم يقع بين طبقات متوازية .

Discontinuous reaction series

سلسلة التفاعل غير المتصلة

تتابع التفاعلات غير المستمرة ، والذى تتفاعل خلاله المعادن مبكرة التكوين فى الصهارة المتبلورة مع السائل المتبقى لتتكون معادن جديدة ، انظر continuous reaction series.

Dissolution **ذوبان (إذابة)**

عملية التجوية الكيميائية عندما تتحول المعادن والمواد الصخرية إلى محلول .

Dissolved load **حمولة ذائبة**

مادة ذائبة فى ماء مجرى مائى .

Divergent plate margin **حد لوح متباعد**

نوع من الحدود بين الألواح ، ويعرف أيضا بمركز انتشار spreading center ، حيث تتباعد الألواح عند نطاق الانتشار ويتكون عندها قشرة محيطية جديدة ، ويتميز بوجود صدوع الشد والبراكين البازلتية وطوبوغرافية وعرة وبؤر زلزالية ضحلة.

Divide **مقسم المياه**

الخط الذى يفصل بين حوضين نهريين متجاورين .

Dolostone **حجر الدولوميت**

صخر رسوبى يتكون أساسا من معدن الدولوميت (كربونات الكالسيوم والماغنسيوم) $CaMg(CO_3)_2$، يتكون عادة من الإحلال فى الحجر الجيرى $CaCO_3$ بإدخال أيون ماغنسيوم محمول فى الماء المتخلل .

Dome **قبة (تكتونية)**

تركيب دائرى (طية محدبة) له مقطع دائرى أو إهليجى تميل فيه الطبقات بقدر متساو من نقطة مركزية إلى الخارج فى جميع الاتجاهات .

Drainage basin **حوض صرف**

المنطقة الكلية التى تمد المجرى المائى بالماء .

Diatomite **دياتومايت**

صخر رسوبى يتكون نتيجة لتصخر الحمأ السيليكى .

Diatreme **دياتريم**

مخرج أو منفذ بركانى امتلأ ببريشيا بركانية عند الهروب الانفجارى للغازات .

Differential stress **إجهاد متباين**

إجهاد لمادة صلبة ، لا يكون متساويا فى جميع الاتجاهات .

Differential weathering **تجوية متفاوتة (متباينة)**

تجوية تحدث بمعدلات أو بشدة مختلفة كنتيجة للتغير فى تكوين وتركيب الصخر .

Differentiation of the earth **تمايز الأرض**

فصل مكونات الأرض الفيزيائية والكيميائية من كوكب ابتدائى متجانس لتكوين لب ووشاح وقشرة ومحيطات وغلاف جوى . وقد حدث معظم هذا الفصل فى وقت مبكر من تاريخ الأرض ، وإن كان بعض التمايز لازال يحدث إلى الآن من خلال الثورات البركانية وبناء الجبال .

Dike **قاطع**

صخر نارى متداخل نضيدى ، له امتداد أفقى واسع ومحدود السمك ويقطع أسطح طباقية الصخور الحاوية له .

Diorite **ديوريت**

صخر نارى متداخل خشن التحبب له تركيب متوسط بين الجرانيت والجابرو ، يحتوى على فلسبار البلاجيوكليز وأمفيبول ، وقد يخلو من الكوارتز .

Dip **ميل الطبقة**

الزاوية بالدرجات المحصورة بين المستوى الأفقى ومستوى مائل، مقاسة إلى أسفل فى مستوى عمودى على مستوى المضرب.

Dip-slip fault **صدع ميلى الزلة**

صدع عادى أو معكوس ، تحدث الحركة فيه فقط فى مستوى عمودى على مضرب سطح الصدع .

Discharge **تصريف**

كمية الماء التى تمر على نقطة معينة فى مجرى مائى أثناء وحدة الزمن .

Deflation تذرية

إزالة الحبيبات المفككة بالرياح .

Delta دلتا

جسم من الرواسب ترسب بفعل مجرى مائى ، يصب فى ماء هادئ .

Dendritic drainage صرف شجيرى

نظام نهرى يتفرع دون نظام ، يشبه تفرع الشجرة .

Density كثافة

العلاقة التى تساوى الكتلة على وحدة حجم .

Denudation تحات

مجموع عمليات التجوية والنقل وانهيال الكتلة والتعرية التى تؤدى إلى انخفاض مستوى سطح الأرض .

Desert صحراء

أرض جافة (قاحلة) أو مجدبة سواء تصحرت أم لا ، ويكون فيها معدل سقوط المطر السنوى أقل من 250 مم ، أو يزيد فيها معدل التبخر على معدل التساقط . وهى ليست بالضرورة منطقة ذات مناخ حار ، حيث توجد أيضا صحارى فى المناطق القطبية .

Desertification تصحر

غزو الصحراء للمناطق غير الصحراوية .

Desert pavement رصيف صحراوى

أرض صحراوية مستوية مفروشة بالحصى تكونت نتيجة تذرية deflation الرياح للمواد الدقيقة .

Desert varnish ورنيش الصحراء

طلاء رقيق لامع ، ذو لون غامق ، يتكون أساسا من خليط من معادن الصلصال والمنجنيز وأكاسيد الحديد، على الأسطح الحجرية ومكاشف الصخور فى المناطق الصحراوية نتيجة لطول فترة التعرض للتجوية ، ويعرف أيضا بورنيش الصخر rock varnish.

Diagenesis تغيرات ما بعد الترسيب

التغيرات الكيميائية والفيزيائية والبيولوجية التى تؤثر على الراسب بعد ترسيبه الأصلى ، وذلك أثناء وبعد تحوله ببطء إلى صخر رسوبى ، خلال عمليتى التصخر lithification والكبس compaction .

Diastem فصلة

فترة زمنية قصيرة نسبيا مفقودة من التتابع الطبقى.

D

Dacite داسيت

صخر نارى دقيق التحبب، له تركيب الجرانوديوريت.

Darcy's law قانون دارسى

العلاقة بين التفريغ ومعامل النفاذية والمعامل الهيدروليكى فى الماء الجوفى المتخلل .

Daughter-isotope dating التأريخ بالنظائر الوليدة

مقارنة نسب مختلف النظائر الوليدة إشعاعية النشأة لتحديد عمر الصخور . ونظرا لأن النظائر الوليدة تتولد بمعدلات مختلفة ، فإن نسبتها لبعضها البعض تتغير مع تقدم الزمن ، مما يقدم أساسا لتقدير العمر .

Daughter atom ذرة وليدة

ذرة تنتج من الاضمحلال الاشعاعى. قارن بالولود parent.

Debris avalanche هيال الحطام

انسياب حبيبى نتيجة حركة الحطام الصخرى (الأديم) regolith بسرعة كبيرة (أكثر من 10 م/ ثانية) على المنحدرات .

Debris fall سقوط الحطام

السقوط الحر النسبى أو انهيار الحطام الصخرى (الأديم) من جرف أو منحدر حاد أو كهف .

Debris flow انسياب الحطام

أحد أنواع انسيابات الطين المائع ، حيث تحدث حركة على منحدر (عادة على المراوح الطمية) لكتلة من حطام صخرى (أديم) غير متماسك ، يكون حجم معظم مكوناتها أخشن من الرمل .

Debris slide انزلاق الحطام

حركة الحطام الصخرى (الأديم) على سطح مائل بسرعة تتراوح بين البطء والسرعة .

Decay series سلسلة الاضمحلال

النظير المشع الولود وكل النظائر الوليدة الناتجة عن تحلله مثل تحلل البوتاسيوم 40 (K^{40}) إلى أرجون 40 (Ar^{40}) والروبيديوم 87 (Rb^{87}) إلى استرانشيوم 87 (Sr^{87}) واليورانيوم 238 (U^{238}) إلى الرصاص 206 (Pb^{206}) .

Decomposition تحلل

تجوية الصخور كيميائيا .

وتتكون من مادة صخرية أقل كثافة من صخور الوشاح mantle التي تسفلها .

Crystal بلورة

مركب صلب يتكون من ذرات أو أيونات تترتب بشكل منتظم فى ترتيب ثلاثى الأبعاد ، كما ترتبط كيميائيا معا وتأخذ شكلا بلورياً .

Crystal faces أوجه البلورة

الأسطح المستوية التى تحدد البلورة .

Crystal form شكل البلورة

الترتيب الهندسى لأوجه البلورة .

Crystal habit هيئة البلورة

الشكل العام للبلورة ، مثل المكعبى أو المخروطى .

Crystallization تبلور

تكوين البلورات الصلبة من مواد غازية أو سائلة ، مثل تكوين المعادن المتبلورة من الصهارة .

Crystalline متبلور

انظر التركيب البلورى .

Crystal structure بنية بلورية

الشكل الهندسى الذى تأخذه الذرات فى المادة الصلبة . وتعرف أى مادة صلبة لها بناء بلورى بأنها متبلورة crystalline .

Cuesta (=questa) كويستا

وحدة جيومورفولوجية لها جانبين يكون أحدهما مائلا بلطف يوازى مستويات التطبق ، بينما يكون الآخر مائلا بشدة فى الاتجاه المعاكس ، ويستخدم أحيانا مصطلح escarpment or scarp كمرادف لكويستا .

Curie point نقطة كورى

درجة الحرارة التى لا يمكن أن تحتفظ المادة بمغناطيسية دائمة فوقها .

Cutoff قطع نهرى

مجرى يحفره النهر فى المنطقة الضيقة بين منعطفين ليختصر طول مجراه تاركا خلفه بحيرات قوسية .

Cycle of erosion دورة التجوية

تتابع مقترح من التغيرات فى شكل الأرض ، حيث يتغير من شكل مرتفع حاد كجبل ، إلى تلال منخفضة مستديرة ، تؤول فى النهاية إلى سهول مستقرة تكتونيا .

Correlation مضاهاة

مقارنة الطبقات فى منطقتين أو أكثر منفصلة جغرافيا عن بعضها، للوصول إلى تشابه فى العمر . وتقوم معظم المضاهاة العادية على مقارنة الحفريات المرشدة، كما قد تعتمد على تقديرات عمر متشابهة من المواد المشعة أو انعكاسات قطبية الأرض المغناطيسية وغيرها .

Country rock صخر الإقليم

الصخر الذى يتداخل فيه صخر نارى ، أو يتوضع فيه راسب معدنى .

Covalent bond رابطة تساهمية

قوة جذب بين ذرتين ، ملئت مستويات الطاقة لها بالاشتراك فى الكترون أو أكثر .

Crater فوهة (بركان)

منخفض يشبه القمع ، مفتوح من أعلى ، يقع فى قسة بركان ، تنبعث منه الغازات والفتات الصخرى واللابة.

Craton رسيخة

لب من صخر قديم فى القشرة الأرضية ، يتميز بثبات تكتونى وايزوستاتيكى .

Creep زحف

حركة الحطام الصخرى (الأديم) regolith البطيئة وغير المحسوسة أسفل المنحدر تحت تأثير الجاذبية الأرضية .

Crevasse شق جليدى

شرخ عميق فى السطح العلوى للمثلجة .

Cross bedding تطبق متقاطع

طبقات beds أو رقائق laminae مائلة بالنسبة للطبقات الأكثر سمكا التى تحتويها وتوجد فى الرواسب الحبيبية فقط ، مرادف cross-stratification و cross-lamination .

Cross-cutting relationships علاقة القطع المستعرض

أى جسم نارى متداخل أو صدع لابد أن يكون أحدث عمرا من الصخور التى يقطعها ، بينما يكون أقدم عمرا من التى تتقطعه .

Cross section قطاع مستعرض

انظر قطاع جيولوجى عرضى geologic cross section .

Crust قشرة

الطبقة الخارجية الأقل سمكا فى طبقات الأرض ، وتقع فوق انقطاع موهوروفيتش Mohorovicic discontinuity ،

منحدر قارى **Continental slope**

انحدار واضح فى قاع البحر بعد منطقة الرف القارى، ويمتد إلى السهل السحيقى abyssal plane.

قوس بركانى قارى **Continental volcanic arc**

سلسلة مقوسة من البراكين الأنديزيتية على القشرة القارية تكونت نتيجة الاندساس subduction. انظر قوس بركانى volcanic arc .

سلسلة التفاعل المتصلة **Continuous reaction series**

التغير المستمر فى التركيب الكيميائى لنفس المعدن من خلال إحلال أيونى مع تغير درجة الحرارة ، وكلما تبلورت الصهارة . انظر سلسلة التفاعل غير المستمرة discontinuous reaction series .

خط المنسوب ، الكنتور **Contour**

منحنى على الخريطة التضاريسية يصل بين النقط متساوية الارتفاع .

تيارات الحمل **Convection current**

العملية التى تؤدى إلى صعود المواد الحارة الكثيفة لأعلى ، ويحل محلها مواد باردة كثيفة بالهبوط لأسفل، مما يؤدى لتولد تيارات حمل .

حد لوح متقارب **Convergent margin**

نطاق تتقابل عنده الألواح المتحركة فى اتجاه بعضها .

كوكينا **Coquina**

حجر جيرى يتكون كلية أو غالبا من أصداف مفتتة .

لب **Core**

النطاق المركزى للأرض ، ويصل نصف قطره إلى 3471 كم ، بما يمثل 16 ٪ من حجم الأرض ، وله متوسط كثافة 10.7 جم / سم ^{3} . وتشير الموجات الزلزالية التى تمر فى اللب إلى أن الجزء الداخلى له يكون صلبا بينما يكون الجزء الخارجى منه منصهرا ، ويفترض أنه يتكون أساسا من الحديد والنيكل مع كميات محدودة من الكوبالت والكبريت وربما بعض العناصر الأخرى .

تأثير كريولى **Coriolis effect**

تأثير يؤدى إلى أن ينحرف أى جسم يتحرك بحرية فوق سطح الأرض نحو يمين اتجاه الحركة فى نصف الكرة الشمالى ، بينما ينحرف ناحية يسار اتجاه الحركة فى نصف الكرة الجنوبى.

مجرى انحدارى **Consequent stream**

مجرى يحدد نظام جريانه اتجاه انحدار الأرض .

مواد متماسكة **Consolidated materials**

راسب تصلب نتيجة لترسب معدن بين مكوناته .

تحول تماسى **Contact metamorphism**

تحول ينتج عن تأثير الحرارة والضغط الناشئ من صخر نارى متداخل مجاور ، ويسمى أحيانا تحول حرارى thermal metamorphism.

قشرة قارية **Continental crust**

جزء القشرة الأرضية ، الذى يشمل القارات ، ويصل سمكه إلى 45 كم .

انجراف قارى **Continental drift**

فرضية تشرح تكون القارات نتيجة تكسر كتلة يابسة كبيرة وتحرك كتل اليابسة جانبيا وببطء على سطح الأرض .

مثلجة قارية **Continental glacier**

مثلجة سميكة مستمرة تغطى مساحة تزيد على 50000 كم ^{2} ، وتتحرك حركة بطيئة للغاية مستقلة عن المظاهر التضاريسية الثانوية . (قارن بمثلجة الوادى valley glacier) . انظر فريشة جليدية ice sheet.

حافة قارية **Continental margin**

الجزء من البحر أو المحيط الممتد بين خط الشاطئ وحافة السهل السحيقى abyssal plane، وتشمل الرف القارى continental shelf والمنحدر القارى continental slope والمرتفع القارى continental rise .

ارتفاع قارى **Continental rise**

منطقة تغير طفيف فى الانحدار ، يتقابل عندها قاع حوض المحيط مع حافة قارة .

رف قارى **Continental shelf**

رصيف بحرى مغمور ، متغير الاتساع ، يحيط بالقارة، ويحده من الخارج المنحدر القارى ، ويعرف أيضا بالرصيف القارى continental platform.

درع قارى **Continental shield**

منطقة متسعة من صخور ما قبل الكمبرى النارية والرسوبية والمتحولة مكشوفة من رسيخة craton سوتها عوامل التجوية .

كبس (اندماج) **Compaction**

نقص فى المسامية والحجم الكلى لراسب بسبب ترسب كمية إضافية من الصخور فوقه ، أو بسبب الضغوط الناشئة عن التشوه .

كفاءة (مجرى) **Competence (stream)**

مقياس لأكبر حبيبة يستطيع أن ينقلها المجرى المائى ، وليس الحجم الكلى . قارن بالسعة capacity .

بركان مركب **composite volcano**

مخروط بركانى مكون من طبقات من اللابة المتبادلة مع أخرى من الفتات النارى . مرادف: بركان طباقي stratovolcano.

تركيب(معدن) **Composition (of a mineral)**

النسب المختلفة للعناصر الكيميائية التى تكون معدن ما.

مركب **Compound**

خليط من ذرات عناصر مختلفة مرتبطة معا.

موجات تضاغطية **Compressional waves**

انظر موجاتP .

متداخل متطابق **Concordant intrusion**

صخر نارى متداخل له حدود موازية لأسطح الطباقية أو التورق foliation فى صخور الإقليم المتداخل فيها.

مخروط الانخفاض **Cone of depression**

انخفاض مخروطى فى منسوب الماء الجوفى يحيط بالبئر مباشرة .

مكمن ماء محصور **Confined aquifer**

خزان أرضى محصور بحابس ماء aquiclude أو صخر مانع ، مرادف: Artesian aquifer .

إجهاد حابس **Confining stress**

إجهاد (ضغط) متساو فى الصخور من كل الاتجاهات. يعرف أيضا بالإجهاد المنتظم uniform stress .

توافق **Conformity**

مجموعة من الطبقات ترسبت فوق بعضها على التوالى دون توقف .

كونجلومرات **Conglomerate**

صخر رسوبى يتكون من فتات مدور فى حجم الجرول gravel يلحم بمادة لاحمة دقيقة الحبيبات.

انفصام **Cleavage**

ميل المعدن للتكسر فى اتجاهات مفضلة ، على امتداد أسطح مستويات انعكاس براقة .

مناخ **Climate**

معدل ظروف الطقس فى مكان أو منطقة ما خلال فترة تقدر بالسنين .

فحم **Coal**

صخر رسوبى أو متحول ، لونه أسود قابل للاحتراق، يتكون أساسا من تحلل مادة نباتية تحتوى على أكثر من 50 ٪ مادة عضوية .

تفحم **Coalification**

المراحل التى تمر بها مادة نباتية لتتحول أولا إلى خث (بيت) peat، ثم لجنيت lignite ، ففحم شبه بتيومينى subbituminous ففحم بتيومينى bituminous coal فأنثراسيت.

شاطىء **Coast**

شريط الأرض المجاور للمحيط أو البحر ويمتد بين أقل جزر ونقطة التغير الرئيسى فى شكل تضاريس اليابس.

زلط **Cobble**

كسرة صخرية أكبر من الحصاة pebble وأصغر من الجلمود boulder يقع قطرها بين 64 و 256 مم ، كورت وهذبت حوافها بسبب البرى أثناء النقل .

نطاق الاصطدام **Collision zone**

تكسر مختلف ألواح القشرة الأرضية لتكون أحزمة تجبلية . وهى قد تشمل تصادم قارة – قارة أو قوس – قارة أو قوس – قوس أو حيد – قارة .

كولوفيوم (رسوبيات متراكمة) **Colluvium**

رواسب مفككة غير متماسكة ، توجد على قاعدة المنحدرات وتتحرك أساسا بالتدحرج .

فواصل عمدانية **Columnar joints**

فواصل تقسم الصخور النارية إلى أعمدة أو منشورات رأسية .

مذنب **Comet**

جرم سماوى صغير يدور حول الشمس فى مدار بيضاوى .

مجرى **Channel**

الممر الذى ينساب خلاله المجرى المائى، وعادة ما يوجد فى أكثر مناطق المجرى انخفاضا .

طباشير **Chalk**

الأصداف المتصلبة للكائنات الحية الجيرية الدقيقة الطافية .

العناصر الكيميائية **Chemical elements**

المواد الأساسية التى يمكن أن تنفصل عندها المادة بوسائل كيميائية .

رواسب كيميائية **Chemical sediments**

رواسب تكونت بترسيب المعادن من محلول مائى ، ويكون عادة ماء البحر .

تجوية كيميائية **Chemical weathering**

تحلل الصخور من خلال تفاعلات كيميائية مثل التميّه hydration والأكسدة .

تشرت **Chert**

صخر رسوبى يتكون من سيليكا ترسبت كيميائيا أو بيوكيميائيا.

مخروط حمم فتاتية **Cinder**

تل مخروطى شديد الانحدار يحيط بقصبة بركان يتكون من فتات نارى خشن يتطاير من القصبة بفعل الغازات الهاربة.

دارة الجليد **Cirque**

تجويف يشبه نصف فنجان الشاى قطع رأسيا ، مفتوح على جانب جبل ، حفر أساسا بتوتد صقيعى frost wedging واقتلاع plucking وتمزق الصخور بفعل الجليد .

فتات **Clast**

أى حبيبة وحيدة من راسب فتاتى .

راسب فتاتى **Clastic sediment**

راسب أو صخر رسوبى تكون من حبيبات أو فتات ، نتجت عن تجوية صخر سابق ونقلت ميكانيكيا .

صلصال **Clay**

أحد معادن الألومنيوسيليكات المائية ، لها بناء بلورى صفائحى sheetlike ، تكونت من تجوية وتميؤ سيليكات أخرى . كما تطلق على أى فتات معادن أصغر من 0.0039 مم .

قدرة (مجرى مائى) **Capacity (stream)**

كمية الرواسب والفتات التى ينقلها مجرى مائى عند نقطة معينة فى فترة زمنية محددة .

رصيف جيرى **Carbonate platform**

منطقة ضحلة واسعة ، حيث تترسب كلا من الكربونات العضوية وغير العضوية .

راسب أو صخر كربوناتى **Carbonate sediment, rock**

راسب أو صخر رسوبى تكون من تجمع المعادن الجيرية المترسبة عضويا أو بطريقة غير عضوية ، وتشمل أساسا صخور الحجر الجيرى والدولوميت .

حمض الكربونيك **Carbonic acid**

حمض ضعيف ينتج من إذابة كميات محدودة من ثانى أكسيد الكربون فى ماء المطر أو المياه الأرضية (الجوفية) .

تحول تهشمى **Cataclastic metamorphism**

تحول الضغط العالى ، أو التحول الذى يؤدى إلى تغير فى النسيج بسبب تأثيرات ميكانيكية مثل السحق crushing والجز shearing وإعادة البلورة ، دون تغير فى المحتوى المعدنى ، ويؤدى إلى تكوين صخر دقيق التحبب للغاية .

نظرية الكوارث **Catastrophism**

المبدأ الذى ينص على أن كل مظاهر القشرة الأرضية الرئيسية مثل الجبال والوديان والمحيطات قد نشأت بسبب عدد قليل من الأحداث الضخمة الكارثية .

كاتيون **Cation**

أيون موجب .

تلاحم **Cementation**

عملية تحدث بعد الترسيب تتحول فيها الرواسب المفككة إلى صخر بترسيب المعادن فى الفراغات الموجودة بين حبيباتها.

حقب الحياة الحديثة **Cenozoic**

أحدث أحقاب زمان الحياة الظاهرة .

عنق (مخرج) مركزى **Central vent**

أكبر قصبة للبركان ، توجد فى مركز مخروطه .

انبثاق مركزى **Central eruption**

خروج اللابة من فتحة مركزية بالنسبة للمخروط البركانى .

المصاحب للزيت فى آبار البترول ، وهو ماء حار شديد الملوحة يحتوى أساسا على أيونات الكالسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والكلور بالإضافة لعناصر أخرى بنسب محدودة .

مادة قصفة **Brittle material**

المادة التى تتكسر فجأة عندما تصل إلى حد لدونتها ، وعكسها المادة القابلة للسحب والطرق ductile material .

تحول بالدفن **Burial metamorphism**

التحول الناشئ عن دفن صخور رسوبية أو فتاتية نارية .

تل نضيدى **Butte**

تل صحراوى مفرد ، ذو قمة مستوية وجوانب شديدة الانحدار، أصغر من الميسا mesa.

C

نطاق – ج **C- horizon**

أعمق نطاقات التربة ، ويقع تحت النطاق (أ) و/ أو النطاق (ب) فى بروفيل التربة . ويكون ذا لون أصفر إلى بنى ، ويتكون من تجوية صخر أو راسب سابق .

حمأ جيرى **Calcareous ooze**

راسب بحرى عميق يتكون أساسا من بقايا الهياكل الجيرية.

كالديرا **Caldera**

منخفض بركانى كبير يشبه حوض الترسيب ، يبلغ قطره عدة كيلومترات أو أكثر ، له جوانب رأسية ، يتكون بعد ثورة بركان ، يعتقد أنها تتكون نتيجة انهيار سقف غرفة الصهارة الخالية .

التجبل الكاليدونى **Caledonian orogeny**

حركة أرضية بانية للجبال حدثت فى حقب الحياة القديمة المتوسطة (انتهت فى السيلورى-الديفونى) ، أثرت على شمال غرب أوروبا وشرق جرينلند ، ونشأت عن الاصطدام بين هاتين الكتلتين القارتين .

كاليش (قشرة كلسية) **Caliche**

طبقة فى بروفيل التربة ، صلبة غير مسامية غالبا ، تتكون من كربونات الكالسيوم البيضاء .

انفصال جليدى **Calving**

التفتت المتلاحق لجبال الجليد فى مقدمة المثلجة التى تنتهى فى المياه العميقة .

شست أزرق **Blueschist**

صخر متحول تكون تحت ضغط مرتفع وحرارة منخفضة نسبيا ، ويكتسب اسمه من وجود معدن الجلوكوفين وهو معدن أمفيبول أزرق .

موجات داخلية (جسمية) **Body waves**

موجات زلزالية تنتقل من بؤرة الزلزال إلى القشرة الأرضية.

نيزك **Bolide**

جسم يصطدم بالأرض ، قد يكون نيزكا أو كويكبا أو مذنبا .

قذيفة بركانية **Bomb**

حبيبة تفرا قطرها أكبر من 64 مم .

رابطة **Bond**

القوة الدافعة الكهربية التى تربط الذرات ببعضها لتكون مركبات نتيجة لانتقال الالكترونات أو المشاركة فيها .

طبقة القاع **Bottomset layer**

طبقة مسطحة من راسب دقيق الحبيبات ، تترسب على الجانب المواجه للبحر من الدلتا ، وتدفن لاحقا باستمرار نمو الدلتا .

جلمود **Boulder**

كتلة صخرية منفصلة ومنقولة ، قطرها أكبر من 256 مم ، مستديرة إلى حد ما ، يظهر عليها أثر البرى والاحتكاك أثناء عملية النقل ، وهو أكبر أقسام الفتات فى الصخور الرسوبية .

سلسلة بوين التفاعلية **Bowen's reaction series**

وصف تخطيطى للمراحل التى يتبلور عندها المعادن المختلفة أثناء تبرد وتبلور الصهارة .

مجرى مجدول (مضفر) **Braided stream**

مجرى مائى ، يتكون من عدة أفرع تفصلها حواجز وجزر ، تلتقى فى مجرى واحد مرة ثانية ، ويتكرر هذا عدة مرات ، مما يعطى فى النهاية مجرى به عديد من المنعطفات الصغيرة .

بريشيا **Breccia**

صخر خشن التحبب يتكون من فتات صخرى زاوٍ دقيق الحبيبات وملتحم بمادة لاحمة .

أجاج (ماء مالح مر) **Brine**

الماء الذى يملأ الفجوات المسامية فى أحواض الترسيب العميقة ، أو الماء الموجود فى أحواض محجوزة كالبحر الأحمر ، أو الماء

نطاق بنى أوف **Benioff zone**
نطاق ضيق معروف جيدا ببؤر النشاط الزلزالى العميق ، ويقع تحت خندق قاع البحر .

بنتونيت **Bentonite**
رماد بركانى يستقر على قاع البحر ويتحول لاحقا إلى صلصال .

جسيمات بيتا **Beta particle**
الكترون انطلق من نواة ذرة أثناء تحول إشعاعى معين.

Biochemical sediment, rock
راسب أو صخر كيميائى أو حيوى
راسب أو صخر يحتوى على بقايا معدنية من الكائنات الحية مثل الأصداف ، أو معادن ترسبت من مواد ذائبة فى المياه نتيجة لعمليات بيولوجية مثل ما يحدث فى تكاوين الحديد .

صخر أو راسب حيوى النشأة **Biogenic rock**
صخر أو راسب تكوّن من بقايا عضوية (حفريات) .

الغلاف الحيوى **Biosphere**
ويشمل كل الكائنات الحية التى تعيش على الأرض ، وأيضا كل المادة العضوية التى لم تتحلل تماما . وهو يشمل أجزاء الغلاف الصخرى والجوى والمائى التى يمكن أن توجد بها كائنات حية .

حيوى **Biotic**
تابع للنباتات أو الحيوانات .

تقليب (اضطراب) حيوى **Bioturbation**
أن تعيد الأحياء استخدام الرواسب الموجودة حولها.

فحم بيتومينى **Bituminous coal**
أعلى درجات الفحم ، وهو يعرف غالبا بالفحم الأسود.

تصدع كتلى **Block faulting**
تفتت أو تكسر القشرة الأرضية بسبب الشد الناتج عن انزلاق كتل الصدوع المتوازية بالنسبة لبعضها البعض.

درجة حرارة الانسداد **Blocking temperature**
درجة الحرارة التى يصبح عندها معدن ما نظام كيميائى مغلق بالنسبة لسلسلة تحلل إشعاعى ما عند تبرده ، وتحدد نسبة العنصر المشع إلى النظير غير المشع متى حدثت هذه الدرجة .

كثيب انطلاق **Blowout**
(1) كثيب رملى هوائى على شكل قطع مخروطى ، يمتد بعيدا عن الشاطئ ، ويكون له مسقط رمل محدب يتجه تحت مستوى الرياح . (2) منخفض ضحل فى الرمال أو التربة الجافة ، له شكل دائرى أو بيضاوى، تكون بسبب تجوية الرياح .

باثوليث **Batholith**
كتلة صخرية ضخمة غير منتظمة الشكل تقطع صخور الإقليم ، ويظهر منها على السطح 100 كم^2 على الأقل. تتكون عادة من صخور نارية متداخلة ، ولكن قد تتكون أحيانا من صخور الإقليم تحت تأثير حرارة وضغط مرتفع.

بوكسيت **Bauxite**
صخر يتركب أساسا من أكاسيد الألومنيوم المائية ، تكوّن نتيجة للتجوية الكيميائية فى مناطق مدارية بنظام صرف جيد . وهو خام الألومنيوم الرئيسى .

شرم **Bay**
انحناء واسع مفتوح أو شرم من بحر أو بحيرة فى كتلة يابسة مجاورة .

شاطىء **Beach**
راسب غسله الموج على امتداد الشاطئ ، يمتد خلال نطاق حركة الأمواج .

انجراف شاطىء **Beach drift**
الحركة غير المنتظمة للحبيبات على امتداد الشاطئ ، حيث تتحرك الحبيبات إما بانحراف أعلى منحدر الشاطئ تحت تأثير الأمواج المتلاطمة أو فى مسار مستقيم أسفل هذا المنحدر تحت تأثير الأمواج المرتدة.

طبقة **Bed**
أصغر وحدة رسمية فى جسم مكون من صخور رسوبية أو رواسب . (انظر طبقة strata) .

تطبق **Bedding**
الترتيب المتتالى للطبقات فى أى جسم من الرواسب أو الصخور الرسوبية ، حيث تفصل أسطح مستوية ومتوازية طبقات مختلفة فى حجم الحبيبات أو التركيب والتى ترسبت فى أزمنة مختلفة .

مستوى التطبق **Bedding plane**
السطح العلوى أو السفلى للطبقة .

حمل القاع **Bed load**
حبيبات الرواسب التى تتحرك على قاع مجرى نهر بالدحرجة rolling والوثب (القفز) saltation.

صخر الأساس – صخر القاع **Bedrock**
الكتلة المستمرة من الصخر الصلب التى تكون القشرة.

Badland أرض وعرة

شكل تضاريسى يتميز بنظم تجوية مجارى مائية معقدة، ويوجد على أسطح مغطاة بغطاء نباتى محدود أو خال من الغطاء النباتى تماما، يغطى رمالاً وغرينًا وطفلاً غير متماسك أو متماسك قليلا .

Bajada بجادا

سياج من الرواسب متسع فى مقدمة جبل تكون من تلاقى عدة مراوح طمية متجاورة.

Barchan dune كثيب برخان

كثيب رملى هوائى ذو شكل هلالى ، يتحرك عبر سطح مستو ، حيث تشير نقطتا الهلال (القرنان horns) إلى الجانب المدابر للريح . ويكون جانبه المحدب فى اتجاه الريح بينما يكون جانبه المقعر عكس اتجاه الريح .

Barrier reef شعب حاجزى

شعب مرجانى يفصله عن اليابس لاجون .

Basal slip قطاع قاعدى

انزلاق المثلجة على قاعدتها .

Basalt بازلت

صخر نارى مافى ذو لون رمادى إلى أسود ، يتكون أساسا من فلسبار بلاجيوكليز كلسى وبيروكسين ، وهو المقابل السطحى للجابرو .

Basaltic magma صهارة بازلتية

أحد الأنواع الثلاثة الشائعة من الصهارة ، وتحتوى على 50 ٪ من وزنها من ثانى أكسيد السيليكون SiO_2.

Base level مستوى القاعدة (المستوى الأدنى للتعرية)

مستوى محدد لا يستطيع المجرى المائى أسفله أن يقوم بعملية النحر ، وغالبا ما يكون هو مستوى سطح البحر أو مستوى بحيرة .

Basement rocks صخور القاعدة

تجمع معقد من الصخور النارية والمتحولة ، تأتى أسفل كل المكونات الرسوبية، وتكون أقدم الصخور المعروفة فى منطقة ما ، وهى تتبع عادة ما قبل الكمبرى أو الباليوزوى.

Basin حوض (تكتونية)

تركيب (طية مقعرة) دائرى مقعر ضخم ، تميل فيه الطبقات نحو مركزه.

Atoll أتول

شعب مرجانى له شكل دائرى عامة ، ويحتوى لاجون ضحل فى وسطه .

Atom ذرة

أصغر جسيم مفرد ، يحمل كل الخصائص التى تميز العنصر التابع له .

Atomic number العدد الذرى

عدد البروتونات الموجودة فى نواة الذرة .

Atomic substitution إحلال ذرى

انظر الاحلال الأيونى ionic substitution .

Atomic weight الوزن الذرى

مجموع كتلة البروتونات والنيترونات الموجودة فى نواة ذرة عنصر.

Axial plane المستوى المحورى

مستوى تخيلى يقسم الطية إلى قسمين متماثلين تقريبا ، ويمر عبر محور الطية .

Axis محور (الطية)

خط متوسط بين طرفى (جناحى أو ذراعى) الطية يمر عبر قمة crest الطية المحدبة أو قاع trough الطية المقعرة .

Aulacogen أولاكوجين

خسيف محصور بصدع ممتد عموما فى حافة رسيخة وممتلئ بطبقات سميكة ، يعتقد أنه تكون عندما بدأت قارة عملاقة فى التفتت .

Axis of spreading محور انتشار

محور افتراضى يوضح دوران لوح أو زوج من الألواح ، وهو ليس محور الدوران الجغرافى للأرض.

B

B- horizon نطاق – ب

أحد نطاقات التربة يقع عموما تحت نطاق أ (A horizon) ، ويكون عادة ذا لون بنى أو محمر ، وتزيد فيه عادة نسبة الطفل وأكاسيد الحديد .

Backarc basin حوض خلف قوس

حوض ترسيب له شكل القوس تكون بسبب ترقق القشرة الأرضية خلف قوس صهارى .

بئر ارتوازية **Artesian well**

بئر يرتفع فيه الماء فوق الخزان .

حيد لازلزالى **Aseismic ridge**

حيد تحت البحر ذو أصل بركانى ، بعيد عن حواف الألواح الحالية ولذا يتميز بغياب النشاط الزلزالى (تقارن بحيود وسط المحيط والتى تكون نشطة زلزاليا).

رماد **Ash**

تفرا تكون قطر الحبيبات فيها أقل من 2 مم ، وتسمى أحيانا الرماد البركانى volcanic ash .

فيض الرماد **Ash flow**

خليط من الفتات النارى دقيق الحبيبات والغازات مرتفعة الحرارة يندفع من فوهة بركانية .

طف الرماد **Ash tuff**

فتات نارى يكون فيه قطر حبيبات التفرا أقل من 2 مم.

أسفلت ، زفت ، قطران **Asphalt**

انظر "القار tar" .

تمثل **Assimilation**

ابتلاع الصهارة لأجسام صلبة أو سائلة غريبة وهضمها ، مثل أجزاء من الصخر المضيف . وتعرف الصهارة أو الصخر الناتج عنها بعد التمثيل بالصهارة أو الصخر الهجين .

كويكبات **Asteroids**

أجسام صخرية غير منتظمة الشكل لها مدارات تقع بين مدارات المريخ والمشترى .

الغلاف اللدن (الأسثينوسفير) **Asthenosphere**

منطقة من الوشاح تقع تحت القشرة ، على عمق 100 إلى 350 كم تحت السطح ، وتتميز بأن الصخور فيها تكون لدنة ولها درجة قليلة من الشدة ويسهل تشويهها، وتكون سرعة الموجات الزلزالية فيها منخفضة ، بينما تكون إعاقة attenuation الموجات الزلزالية عالية، وتحدث الحركة فيها بالتشوه اللدن .

طية غير متماثلة **Asymmetric fold**

نوع من الطيات يكون فيه ميل أحد طرفيها (ذراعيها أو جناحيها) أكبر من الآخر .

الغلاف الجوى **Atmosphere**

خليط من الغازات ، تتكون أساسا من النتروجين والأكسيجين والكربون وثانى أكسيد الكربون وبخار الماء وتحيط بالأرض .

حابس الماء (صخر مانع) **Aquiclude**

جسم صخرى غير منفذ أو أقل نفاذية يجاور مكمن ماء جوفى aquifer ، ويعمل كمانع لانسياب الماء الجوفى ، ويسمى أيضا طبقة حاصرة أو حابسة confining layer .

مكمن ماء جوفى **Aquifer**

جسم صخرى أو حطام صخرى (أديم) منفذ مشبع بالماء ، ويتحرك الماء الجوفى خلاله.

تحدب **Arch**

تركيب رسيخى ممتد على نطاق واسع ، له شكل محدب واسع ، كان الترسيب فيه أقل بينما تأثر بعلاقات عدم توافق أكثر من الأحواض المحيطة .

دهر الأركى **Archean**

دهر يتبع زمان الحياة المستترة ، وهو الدهر الذى يلى دهر الهاديان.

حيد المثلجة **Arete**

مرتفع مستطيل له قمة مشرشرة حادة تتكون عندما تزداد دارات cirques الجليد المتجاورة فى الحجم وتتقارب وتتقابل تدريجيا عند قمة الجبل.

أرجيليت **Argillite**

صخر منخفض رتبة التحول يتكون من صخر الطفل الرسوبى ، ويتميز بتكسر غير منتظم وغياب للتورق.

أركوز **Arkose (arkosic sandstone)**

حجر رملى غنى فى الفلسبار (أكثر من 25٪ فلسبار).

مكمن ماء ارتوازى **Artesian aquifer**

مكمن (خزان) ماء جوفى يكون الماء فيه تحت الضغط الهيدروليكى.

انسياب ارتوازى **Artesian flow**

الانسياب فى مكمن ماء جوفى محصور ، ويكون الماء الجوفى فيه واقعا تحت ضغط أكبر من الضغط فى الخزان غير المحصور على عمق مشابه ، مما يؤدى إلى أن الماء فى البئر الذى يحفر فى الخزان المحصور يرتفع إلى أعلى .

عين ارتوازية **Artesian spring**

عين ماء طبيعية تستمد ماءها من خزان ارتوازى .

زاوية الاستقرار **Angle of repose**

أكبر زاوية انحدار ، مقاسة من الأفقى يمكن أن يستقر هندها حطام صخرى دون أن ينحدر لأسفل أو يتساقط.

عدم توافق زاوى **Angular unconformity**

أحد أنواع عدم التوافق ، وهو سطح تعرية تكون أسطح الطباقية فوقه وتحته غير متوازية ، أى أن زاوية الميل تكون مختلفة فى الصخور الأحدث أعلى سطح عدم التوافق عن الصخور الأقدم أسفل سطح عدم التوافق .

لامائى **Anhydrous**

مصطلح يطلق على المادة الخالية من الماء ، وعكسها مائى.

أنيون **Anion**

أيون يحمل شحنة كهربية سالبة .

أنورثوزيت **Anorthosite**

صخر نارى خشن التحبب يتكون أساسا من البلاجيوكليز .

مجرى مناضل أو سالف **Antecedent stream**

مجرى مائى حافظ على مساره عبر منطقة من القشرة الأرضية تعرضت للرفع نتيجة للطى أو التصدع. أو هو مجرى مائى وجد قبل أن تنشأ التضاريس الحالية ، ولكنه حافظ على مساره الأصلى على الرغم من التغير فى تراكيب وتضاريس الصخور التى تسفله.

أنثراسيت **Anthracite**

صخر متحول عن الفحم بالحرارة والضغط .

تحدب (طية محدبة) **Anticline**

تحدب الطبقات وطيها لأعلى على هيئة قوس ، قارن بالطية المقعرة syncline .

تجبل الأبالاش **Appalachian orogeny**

آخر الحركات الأرضية المهمة البانية للجبال ، والتى أثرت على شرق أمريكا الشمالية فى العصر البرمى وربما حتى العصر الترياسى المبكر . وقد نتج عنها معظم الطيات وصدوع الدسر التى لازالت مؤثرة فى جبال الأبالاش ، إلا أن التضاريس الموجودة حاليا نتجت من الرفع الذى حدث فى حقب الحياة الحديثة وأدى إلى تجدد الأنهار لتحفر أوديتها الحالية .

Apparent polar wandering
مسار التجوال القطبى الظاهرى

الحركات الظاهرية للأقطاب المغناطيسية ، والتى يتم تحديدها من قياسات أوضاع القطب باستخدام المغناطيسية القديمة .

تغيير **Alteration**

تعديل فى التركيب المعدنى للصخر سببته عمليات فيزيائية أو كيميائية ، خاصة تأثير المحاليل الحرمائية. كما يعنى أيضا تعديلاً فى التركيب الكيميائى أو المعدنى للصخر استجابة لعمليات التجوية .

تحديد العمر بالأحماض الأمينية **Amino acids dating**

تحديد العمر اعتمادا على تحليل نسبة الحمض الأمينى D– إلى الحمض الأمينى L– فى عظام حفريات ومواد أصداف العصر الرابع Quaternary.

غير متبلور **Amorphous**

مصطلح يطلق على الجوامد التى تفتقد إلى ترتيب ذرى داخلى .

أمفيبوليت **Amphibolite**

صخر متحول فى درجة تحول متوسطة ، خشن التحبب عموما ، يحتوى على نسبة كبيرة من الأمفيبول وفلسبار البلاجيوكليز .

لَوزة **Amygdule**

حويصلة أو تجويف ممتلئة بمعادن ثانوية مثل الكالسيت والكوارتز ترسبت بفعل المياه الأرضية (الجوفية).

حد لوح طراز الأنديزى **Andean-type plate margin**

حد يشبه ذلك الذى يوجد فى غرب أمريكا الجنوبية له قشرة محيطية هبطت تحت قشرة قارية لينتج قوس بركانى قارى (مثل براكين جبال الأنديز) على حافة قارة .

أنديزيت **Andesite**

صخر نارى بركانى دقيق التحبب ، له تركيب متوسط بين الريوليت والبازلت ، يميز الأقواس البركانية فوق نطاقات الاندساس ، وهو المقابل البركانى للديوريت.

خط الأنديزيت **Andesite line**

خط تقريبى موجود على الخرائط ، يحيط بحوض المحيط الأطلنطى ، ولايوجد أى أنديزيت داخله .

صهارة أنديزيتية **Andesite magma**

أحد ثلاثة أنواع معروفة من الصهارة ، وتتميز بأن نسبة ثانى أكسيد السيليكون SiO_2 بها تكون حوالى 60٪ من وزنها .

زاوية الميل **Angle of dip**

أكبر زاوية بين سطح الطبقة أو أى سطح تركيبى آخر عن الأفقى، وتقاس فى مستوى عمودى على خط المضرب .

معجم المصطلحات

يشمل هذا المعجم جميع المصطلحات المهمة التى وردت فى كل فصل من الكتاب بالإضافة إلى بعض المصطلحات الأخرى التى قد يحتاجها الطالب

مبدأ الواقعية Actualism

افتراض ينص على أن القوانين العلمية الحالية يمكن أن تطبق فى كل الأزمنة ، وبالتالى فإن كل العمليات التى تعمل حاليا على الأرض يفترض أنها كانت تعمل دائما بالطريقة نفسها ، ولكن بمعدلات مختلفة .

عمر Age

قسم من الزمن الجيولوجى يكون أصغر من الحين .epoch

أجلومرات Agglomerate

صخر فتاتى نارى يتكون من تفرا tephra فى حجم القنبلة ، ويكون متوسط حجم حبيبات التفرا أكبر من 64 مم .

نمو بالترسيب Aggradation

بناء بالترسيب ، مثل ما يحدث فى المجرى المائى .

مروحة طمية Alluvial fan

راسب مخروطى الشكل ، يتكون من مواد فتاتية ، ينشأ عندما يتسع المجرى المائى فجأة ، عند انتقال المجرى من فوق جبل إلى واد مفتوح .

طمى Alluvium

راسب ترسب بالمجارى المائية فى بيئات غير بحرية.

جسيم ألفا Alpha particle

جسيم نووى ينبعث من نواة الذرة أثناء بعض التحولات الاشعاعية ، وهو يكافئ نواة ذرة الهيليوم He^4_2 .

تجبل الألب- الهيمالايا Alpine-Himalayan orogeny

حركة رئيسية بانية للجبال ، تمتد من إسبانيا عبر جبال الألب فى جنوب شرق أوروبا فجنوب غرب آسيا فسلسلة جبال الهيمالايا حتى اندونيسيا ، حدثت أثناء الأوليجوسين والميوسين ، ونشأت نتيجة لعدد من الاصطدامات بين قارة وقارة .

A

آه آه Aa

لابة لها مظهر غير منتظم ، تكسرت إلى كتل كبيرة لها نتوءات حادة ، ولها تكوين بازلتى عادة.

نطاق أ A-horizon

أحد مستويات التربة ، والذى يأتى تحت المستوى (O) أو يكون هو أعلى مستويات التربة جميعا . ويكون عموما ذا لون غامق ، ويتميز بوفرة المواد العضوية.

نفاد Ablation

كمية الجليد أو الثلج التى تفقد سنويا من المثلجة بعمليات الانصهار والتسامى وتجوية الرياح وتكسر جليد المثلجة .

برى (سحج ، صنفرة) Abrasion

تآكل الصخر ميكانيكيا نتيجة لاحتكاكه واصطدامه بصخر آخر أو بحبيبات راسب تحمله الرياح أو المياه الجارية أو الجليد .

عمر مطلق Absolute age

عمر حدث أو ظاهرة مقدرا بالسنين ، ويقدر عادة بوسائل تحديد العمر بالمواد المشعة (radiometric dating) .

سهل سحيقى Abyssal plain

منطقة مسطحة كبيرة من قاع البحر العميق ، مغطاة بالرواسب ، ويبلغ انحدار القاع فيها 1م/ كم ، ويتراوح العمق فيها بين 3-6 كم تحت مستوى سطح البحر .

تنامى ، رتق Accretion

عملية تؤدى إلى تجمع الأجسام الصلبة لتكون كوكبًا أو قارة جديدة .

تراكم Accumulation

كمية الثلج التى تضاف إلى كتلة المثلجة .

حافة نشطة Active margin

حافة قارية تتميز بنشاط زلزالى ونارى ، قد يصاحبها ارتفاع جبال، ويرجع ذلك إلى حركة تقارب الألواح أو نتيجة لصدع ناقل .



مكتبة الدار العربية للكتاب
Design.M.T
6 222006 315092